

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**Інженерно-фізичний факультет**  
**Кафедра фізики металів**

«На правах рукопису»  
УДК 669-1

«До захисту допущено»  
В.о. завідувача кафедри  
\_\_\_\_\_ Є.В. Івашенко  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**  
**зі спеціальності 132 Матеріалознавство**  
**на тему:**

**«Вплив температури ізотермічного гартування на технологічні та механічні властивості бейнітного чавуну»**

Виконала:

студентка ІІ курсу, групи ФМ-71мн  
Коваленко Марина Вадимівна \_\_\_\_\_

Керівник:

к.т.н., доцент,  
Холявко В. В. \_\_\_\_\_

Консультант з розділу охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях:

д.т.н., професор,  
Левченко О. Г. \_\_\_\_\_

Консультант з нормоконтролю:

асистент КФМ,  
Шаповалова Н. А. \_\_\_\_\_

Рецензент:

к.т.н., ст. викладач,  
Аршук М. В. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.  
Студентка \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Інженерно-фізичний факультет**

**Кафедра фізики металів**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою  
Спеціальність (спеціалізація) – 132 «Матеріалознавство» («Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Є.В. Іващенко

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Коваленко Марини Вадимівни**

1. Тема дисертації «Вплив температури ізотермічного гартування на технологічні та механічні властивості бейнітного чавуну», науковий керівник дисертації Холявко Валерія Вікторівна, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «19» березня 2019 р. № 929-с.
2. Термін подання студентом дисертації: 16.05.2019.
3. Об'єкт дослідження: міцнісні та демпфуючі характеристики, та їх залежність від температури ізотермічного гартування.
4. Предмет дослідження: бейнітний високоміцний чавун із кулястим графітом.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: опрацювати літературу з тематики роботи включно з іноземними та інтернет-джерелами; підібрати та обґрунтувати вибір комплексу методів дослідження міцнісних та демпфуючих характеристик високоміцного бейнітного чавуну; виготовити зразки за відомою технологією та провести ізотермічне гартування за температур 280 °С, 300 °С, 310 °С, 340 °С, 350 °С, 400 °С; провести випробування за підбраною методикою та зробити обробку результатів; визначити необхідний комплекс дій з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях; виконати обґрунтування науково-технічного та інноваційного потенціалу теми магістерської дисертації з метою розробки стартап-проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 21 слайд, 12 рисунків.

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття «Влияние температуры и условий нагружения на характеристики износа бейнитного чугуна» у вданні «Проблеми тертя та зношування» 3 (76), 2017; тези «Матеріалознавчі засади підготовки зразків із бейнітного високоміцного чавуну до електронно-мікроскопічних досліджень» на XI Міжнародній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 2018; тези “Isothermal Quenching Temperature Impact on Tendency of High Strength Bainitic Cast Iron” на Міжнародній науковій конференції «Матеріали для роботи в експериментальних умовах, 2018; тези «Вплив умов ізотермічного гартування на псевдопружну поведінку ADI чавуну» на XII Міжнародній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 2019.

#### 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Левченко О. Г., зав. кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки, д.т.н., професор		

9. Дата видачі завдання: 4 лютого 2019 року.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір теми та її обговорення.	04.02.2019	викон.
2.	Огляд літератури.	05.02 – 07.04.2019	викон.
3.	Опанування методик дослідження.	11.02 – 01.03.2019	викон.
4.	Проведення експериментів.	25.02 – 26.04.2019	викон.
5.	Аналіз експериментальних результатів.	04.03 – 1.05.2019	викон.
6.	Оформлення дипломної роботи.	01.05 – 14.05.2019	викон.
7.	Захист	21.05.2019	викон.

Студентка

\_\_\_\_\_ Коваленко М. В.

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_ Холявко В. В.

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 96 сторінок, 5 розділів, 38 рисунків, 12 таблиць, 57 джерел.

БЕЙНІТНИЙ ЧАВУН (ADI ЧАВУН); ДЕМПФУВАННЯ;  
ПСЕВДОПРУЖНІСТЬ; ІЗОТЕРМІЧНЕ ГАРТУВАННЯ; ДВІЙНИКУВАННЯ

Об'єкт дослідження — міцнісні та демпфуючі параметри бейнітного високоміцного чавуну та їх залежність від температури ізотермічного гартування.

Мета роботи — визначити вплив різних температур ізотермічного гартування на рівень псевдопружності бейнітного високоміцного чавуну.

Методи дослідження — випробовування на ударний згин, вимірювання мікротвердості, циклічні навантаження, фрактографічний аналіз поверхні зламу, квазістатичний метод визначення демпфуючих характеристик.

Температура ізотермічного гартування впливає на псевдопружну поведінку високоміцного чавуну в умовах циклічних навантажень, оскільки в діапазоні від 280 °C до 400 °C утворюється бейнітна структура із значною кількістю залишкового аустеніту. Останній, у свою чергу, схильний до розпаду під дією пластичної деформації з утворенням мартенситної фази, яка має вищі показники міцності. Таке перетворення сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей виробів, що працюють в умовах складного навантаження, зокрема змінних деталей землеоброблювальної техніки.

## **ABSTRACT**

Master's dissertation: 96 pages, 5 sections, 38 pictures, 12 charts, 57 sources.

**BAINITIC CAST IRON (ADI); DAMPING; PSEUDOELASTICITY;  
ISOTHERMAL QUENCHING; TWINNING**

The object of study is the strength and damping parameters of bainitic high-strength cast iron and their dependence on the isothermal quenching temperature.

The purpose of work is to determine the influence of different isothermal quenching temperatures on the level of pseudo-elasticity for bainitic high-strength cast iron.

Research methods are shock bend test, microhardness measurement, cyclic loading, fractographic analysis of fracture surface, quasistatic method for determination of damping characteristics.

The isothermal quenching temperature affects the pseudoplastic behavior of high-strength cast iron under cyclic loading conditions. A bainite structure with a significant amount of residual austenite is formed in the range of temperatures from 280° C to 400 ° C. Residual austenite is prone to decomposition under the action of plastic deformation with the formation of a martensitic phase, which has higher levels of strength. Such a transformation contributes to the working properties increase of products that operate under difficult loading conditions, in particular, variable parts of the tillage machinery.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....	10
1.1 Структура і властивості чавунів .....	10
1.1.1 Вплив домішок на структуру і властивості чавуну.....	11
1.1.2 Бейнітний чавун .....	12
1.2 Властивості бейнітних високоміцних чавунів .....	15
1.2.1 Технологічні характеристики .....	16
1.2.2 Механічні характеристики .....	17
1.3. Демпфування як механічна характеристика .....	24
1.4 Механізм зміцнення ADI.....	26
1.5 Висновки до розділу 1 .....	27
2 МЕТОДИКА ТА ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	29
2.1 Обґрунтування вибору об'єкта дослідження .....	29
2.2 Отримання бейнітного високоміцного чавуну із кулястим графітом ...	31
2.3. Методи дослідження бейнітного чавуну .....	35
2.3.1 Випробування на одновісний розтяг.....	35
2.3.2 Випробування зразків на удар без надрізу .....	38
2.3.3 ДюрOMETричний аналіз.....	41
2.3.4 Квазістатичний метод визначення демпфуючих властивостей ...	43
2.3.5 Фрактографічний аналіз поверхні .....	47
2.4 Висновки до розділу 2 .....	48
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ .....	49
3.1 Ударна в'язкість ADI чавуну .....	49
3.2 МікродюрOMETричні характеристики матеріалу.....	52
3.3 Механічна поведінка чавуну в умовах одновісного розтягу .....	53
3.4 Фрактографічний аналіз деформованих зразків ADI чавуну .....	57
3.5 Схильність бейнітного чавуну до демпфування та механізм його реалізації.....	60

3.6 Висновки до розділу 3 .....	64
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	67
4.1 Аналіз вимог до безпеки праці .....	67
4.2 Аналіз параметрів приміщення.....	69
4.3 Аналіз освітленості приміщення .....	72
4.4 Вимоги до організації робочого місця .....	73
4.4 Електробезпека.....	74
4.5 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	75
4.5.1 Пожежна безпека.....	76
4.5.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	77
4.6 Висновки до розділу 4 .....	79
5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	80
5.1 Опис ідеї проекту .....	80
5.2 Висновки до розділу 5 .....	85
ВИСНОВКИ .....	86
CONCLUSIONS.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90

## ВСТУП

Довговічність, надійність та якість роботи сільськогосподарської техніки, що застосовується для оброблення ґрунтів (оранка землі, культивуація тощо), залежить від роботи окремих частин відповідних деталей. Обробка землі здійснюється комплексом сільськогосподарських машин – плугами, культиваторами та ін. Термін експлуатації такого обладнання досить короткий, так як роботи ведуться у досить активному середовищі ґрунтів та при високих швидкостях проходження. Враховуючи величезні об'єми оральних робіт, відповідні частини машин дуже швидко зношуються та потребують заміни, що вимагає значних економічних витрат.

Зазвичай для виготовлення робочих деталей ґрунтооброблюваної техніки використовують зарубіжну продукцію, так як вона є якіснішою. Однак, її ціна є набагато вищою, а вітчизняні аналоги хоч і поступаються по собівартості, проте експлуатаційні показники набагато гірші. Із цього слідує висока собівартість як робочих деталей, так і самого процесу проведення робіт. Тому вирішення цього питання із точки зору матеріалознавства є вкрай важливим для забезпечення довговічності та надійності сільськогосподарської техніки, а також для зниження вартості її обслуговування.

Для отримання матеріалу за характеристиками та властивостями схожого на використовувану на разі сталь, слід придивитись до матеріалу суміжного класу – чавуну. У попередніх дослідженнях [1] було запропоновано використовувати бейнітний високоміцний чавун із кулястим графітом (далі ADI чавун) для змінних деталей ґрунтооброблюваних машин (лемешів плугів, лап культиваторів тощо).

Бейнітний чавун із наявністю кулястого графіту у структурі має високі механічні характеристики, кращу зносостійкість (у порівнянні з аналогами) та здатність до самозміцнення. Це пояснюється наявністю в матеріалі додаткового фазового перетворення під дією деформації – так званий TRIP-ефект, який більш відомий для сталей. Однак для класу чавунів це явище тільки почало



досліджуватися, і, виходячи з цього, бейнітний чавун є неабияким перспективним матеріалом.

У бакалаврській роботі досліджувалися зносостійкість ADI чавуну в умовах, наближених до реальних умов експлуатації землеробської техніки. Випробування на тертя-ковзання показали, що в приповерхневих шарах матеріалу відбувається фазове перетворення залишкового аустеніту в мартенсит навіть при підвищеній температурі роботи (25 °C, 50 °C), яке підвищує зносостійкість деталей.

Отже, подальші дослідження спрямовані на вивчення процесів, які відбуваються в об'ємі матеріалу при дії навантаження, особливо – псевдопружну поведінку, яка і забезпечує перебіг фазового перетворення. Важливу роль у визначенні механічних характеристик відіграють умови термічної обробки, які полягали в аустенізації до температури 900 °C протягом 2 годин та подальшому ізотермічному гартуванні в олові за температур 280 °C, 300 °C, 310 °C, 340 °C, 350 °C, 400 °C.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Структура і властивості чавунів

Чавуном називається сплав заліза із вмістом вуглецю від 2,14 % до 6,67 % (див. рис. 1.1) та іншими елементами, який характеризується наявністю евтектичного перетворення: нестабільного (цементитного) або стабільного (графітного).

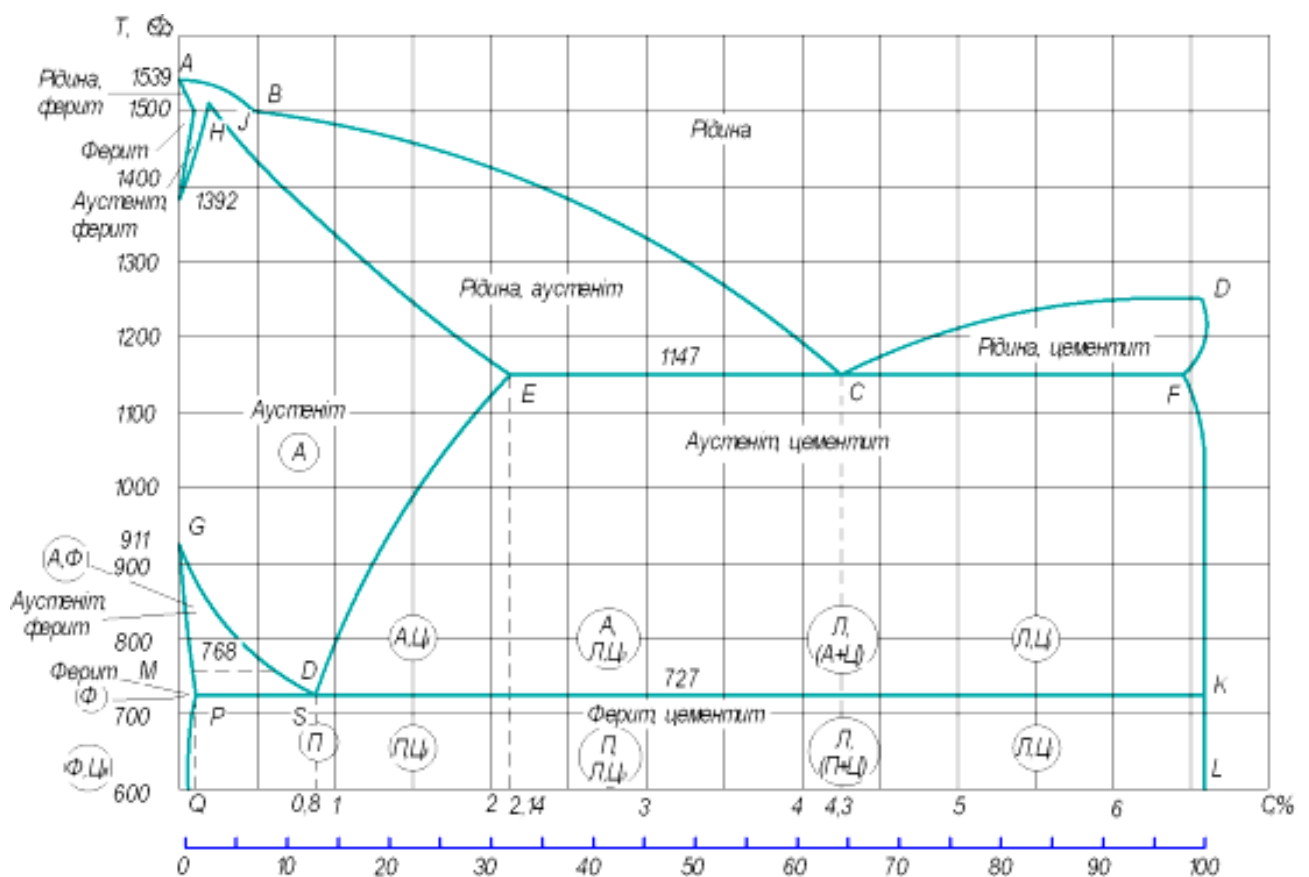


Рисунок 1.1 – Діаграма стану залізо-вуглець [2]

Механічні властивості чавуну залежать від двох чинників:

- кількості, розміру, форми і розподілу графітових вкраплень;
- структури металевої основи.

Перший чинник має вирішальне значення, оскільки графітові включення, розміщуючись у чавуні й утворюючи ніби надрізи в металевій основі,

ослаблюють його міцність (особливо при великих включеннях). При дрібних графітових включеннях чавун має високі механічні властивості [3].

Характер і ступінь графітизації зумовлюється швидкістю тверднення і охолодження чавуну. Чим повільніше відбувається процес тверднення й охолодження, тим краще розкладається карбід заліза, тим більше виділяється графіту.

Другим чинником впливу на міцність чавуну є структура його металевої основи. Нормальна структура, наприклад, сірого чавуну (без додавання легувальних елементів і без термообробки) є феритною чи перлітною, а проміжна між ними — феритно-перлітною металевою основою. Найбільш бажана металева основа чавуну — перліт із вмістом 0,8 % зв'язуючого вуглецю  $Fe_3C$ . Чавуни з феритною і феритно-перлітною основою мають знижену міцність, порівнюючи з перлітним чавуном, але вони характеризуються підвищеною в'язкістю, оскільки в них менше або зовсім немає зв'язуючого вуглецю.

Щоб підвищити механічні властивості чавуну, перед розливанням у форми в рідкий чавун додають модифікатор у вигляді розмеленого силікокальцію (СК) чи феросиліцію (ФС) в кількості 0,1 %... 0,4 % від маси чавуну. Модифікатори розкислюють чавун, утворюють силікатні вкраплення, які є центрами графітизації і гальмують ріст зерен графіту. Це дає змогу одержувати високоміцний чавун з кулястим графітом [3].

#### 1.1.1 Вплив домішок на структуру і властивості чавуну

Вуглець (С) — визначає структуру і властивості чавуну. У чавуні він може бути в структурі цементиту або графіту. Графіт у чавуні має пластинчасту, кулясту і пластівцеву форму. Виділення вуглецю у вигляді графіту надає чавуну кращих ливарних властивостей [4].

Манган (Mn) — збільшує крихкість чавуну, поліпшує рідкотекучість. Він сприяє відбілюванню чавуну, тобто утворенню хімічної сполуки  $Fe_3C$  (цементиту). У чавунах міститься 0,5 %... 1,0 % мангану.

Силіцій (Si) — сприяє графітизації чавуну, тобто утворенню сірого чавуну. Він утворює із залізом хімічні сполуки ( $\text{FeSi}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}_2$ ), які називають силіцидами. Силіциди переходять у твердий розчин із залізом, знижують розчинність вуглецю в залізі, сприяють розпаду цементиту з виділенням графіту. Графітизуючі дії силіцію практично обмежуються 3,5 % його вмісту в чавуні. Змінюючи вміст силіцію в чавуні, можна регулювати в ньому співвідношення між зв'язуючим вуглецем і графітом. Чим більше силіцію, тим більше виділення графіту, а отже, тим менша міцність такого чавуну, нижча твердість — краще обробляється. Силіцій сприяє деякому зниженню температури плавлення, покращує рідкотекучість [4].

Сірка (S) є шкідливою домішкою. Вона сприяє відбілюванню чавуну; значно знижує його рідкотекучість та зумовлює крихкість і схильність до утворення тріщин. Тому вміст сірки обмежується 0,08 %... 0,12 %. Наявність сірки в чавуні затримує розпад цементиту, збільшує усадку, зумовлюючи таким чином утворення структури білого чавуну. При цьому в чавуні з'являються тверді плями, що погіршує його обробку різанням і механічні властивості.

Фосфор (P) у невеликій кількості є корисною домішкою. Він майже не впливає на структуру чавуну, оскільки не прискорює і не сповільнює графітоутворення. Від наявності фосфору в твердому розчині твердість чавуну підвищується, а в'язкість значно знижується, що спричинює погіршення механічних властивостей чавуну. Фосфор поліпшує ливарні властивості: знижує температуру плавлення, збільшує рідкотекучість і сприяє якісному заповненню форми. Тому для лиття тонкостінних виробів беруть чавун із підвищеним вмістом фосфору (1,0 %... 1,25 %), а для звичайного лиття — 0,1 %... 0,9 % P [4].

### 1.1.2 Бейнітний чавун

До бейнітних чавунів відносяться чавуни, структура металевої основи яких частково або повністю складається з бейніту.

Бейнітна структура утворюється в результаті перетворення аустеніту при температурі 250 °С – 500 °С і безперервного охолодження аустенізованого легованого чавуну зі швидкістю вище критичної або ізотермічної витримки аустенізованого чавуну в інтервалі температур бейнітного перетворення [5], яке зазвичай називають ізотермічним гартуванням.

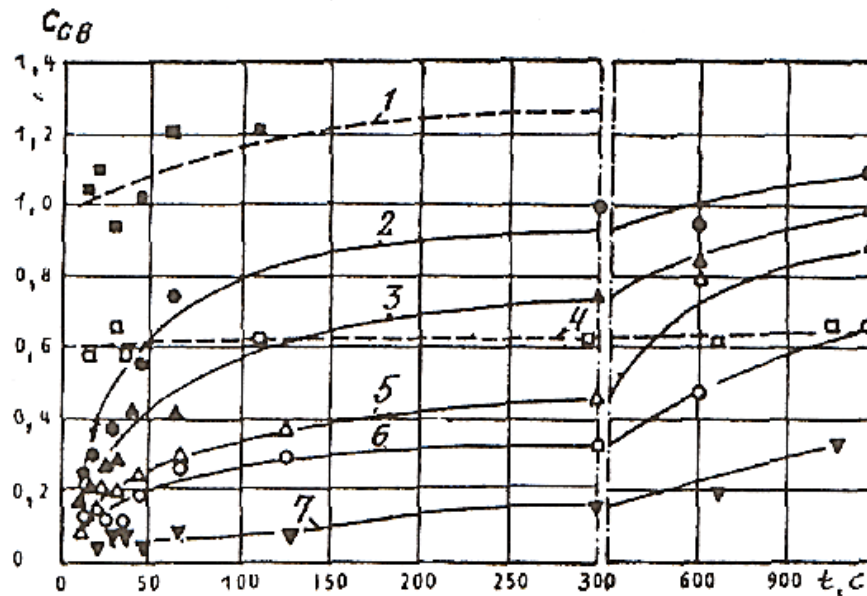
Аустеніт при температурі 500 °С – 350 °С розпадається на  $\alpha$ -ферит і  $\gamma$ -аустеніт із підвищеним вмістом вуглецю. Тривала витримка при температурі розпаду аустеніту призводить до утворення дисперсних карбідів. Розпад аустеніту при ізотермічній витримці залежить від його стану, тобто від вмісту вуглецю та хімічного складу чавуну.

При високій температурі аустенізації концентрація вуглецю в аустеніті підвищується і подальший розпад аустеніту ускладнюється. Вміст вуглецю, розчиненого в аустеніті, визначається тривалістю витримки при температурі аустенізації. На рис. 1.2 показано вплив температури і часу витримки при перлітній і феритній вихідній структурі на кількість зв'язаного вуглецю в чавуні.

При виборі гартувального середовища необхідно враховувати наступне:

- 1) швидкість, із якою вилівок із певними формою і товщиною стінки може бути охолоджений у певному гартувальному середовищі;
- 2) прогартуваність чавуну, яка повинна бути достатньою для гальмування перлітного перетворення під час охолодження до температури ізотермічної витримки.

У структурі нижнього бейніту  $\alpha$ -фаза, утворена в зернах вихідного аустеніту, аналогічна мартенситним голкам і при перенасиченні її вуглецем займає проміжне положення між мартенситом і феритом. При тривалій витримці з неї виділяється вуглець, формуючи дисперсну будову карбідів. Аустеніт при утворенні та виділенні  $\alpha$ -фази виявляється менш перенасиченим вуглецем, ніж при утворенні верхнього бейніту.



1, 2 – 1000 °С; 3 – 950 °С; 4,6 – 850 °С; 5 – 900 °С; 7 – 800 °С;  
суцільна – ферит; штрихова – перліт

Рисунок 1.2 — Залежність кількості зв'язаного вуглецю  $C_{GB}$  в чавуні від температури і часу витримки при перлітній і феритній структурі [5]

Бейнітні структури нестабільні, тому максимальні температури експлуатації та відпуску не повинні перевищувати температур ізотермічного розпаду аустеніту.

Аустеніт, який не розпався при бейнітному перетворенні зазвичай називають залишковим, хоча він відрізняється від вихідного вмістом вуглецю.

Властивості бейніту визначаються його структурою, яка при даній температурі ( $T_A$ ) та тривалості аустенізації ( $t_A$ ) залежить від температури ( $T_I$ ) і тривалості ( $t_I$ ) ізотермічної витримки в області температур бейнітного перетворення. Зі зниженням  $T_I$  масова частка вуглецю в фериті бейніту підвищується, структура його набуває голчастий характер, міцність і твердість спочатку ростуть, а потім знижуються. Нижній бейніт відрізняється від верхнього більш яскраво вираженими голчатою і рельєфною структурою.

При отриманні бейніту в результаті регульованого охолодження виливків з легованого чавуну, тобто при перетворенні аустеніту в певному інтервалі температур, формується неоднорідна структура, яка може складатися з

конгломерату структур сорбітоподібного перліту, верхнього і нижнього бейніту, мартенситу і залишкового аустеніту. У чавуні виникають значні, головним чином фазові, напруження, для зниження рівня яких зазвичай проводиться відпуск [5].

На сьогоднішній день бейнітний високоміцний чавун із кулястим графітом розглядають як прогресивний матеріал, який має всі шанси конкурувати зі сталями. Завдяки такій термічній обробці, як гартування на бейніт, такий матеріал називають ADI чавун (Austempered Ductile Iron) [6].

## 1.2 Властивості бейнітних високоміцних чавунів

Властивості сплавів розділяють на технологічні, що мають велике значення у технології отримання із них виливок та деталей, та експлуатаційні, тобто ті, які визначають його працездатність як матеріалу в конкретних умовах експлуатації.

Деякі з технологічних та експлуатаційних характеристик взаємопов'язані, такі, наприклад, як оброблюваність (технологічна характеристика) та зносостійкість (експлуатаційна характеристика) в умовах зношування. Чим вища зносостійкість, тим зазвичай гірша оброблюваність, так як обидві властивості у більшості випадків визначаються твердістю чавуну, його фазовим складом [7].

Якщо за основу класифікації брати природу властивостей, а не споживчу оцінку, то властивості чавунів поділяють на механічні, фізичні та фізико-хімічні. Варто відзначити, що властивості чавунів дуже залежать від хімічного складу, а й від способу їх отримання.

У стандартах на марки чавунів вказують хімічний склад та властивості чавунів відповідних марок. Із цього ніяк не слідує, що виплавивши чавун заданого хімічного складу, його властивості будуть відповідати вказаному в цих стандартах рівню. Вказані у стандарті хімічний склад та властивості чавуну є всього лиш вимогами до чавуну даної марки, яких повинен дотримуватися

виробник. Механічні та інші властивості чавунів істотно залежать від їхньої мікроструктури, яка може бути змінена в широких межах шляхом проведення термічної обробки або регулюючими охолодженням після тверднення виливки чавуну у формі.

У дослідженнях встановлюють взаємозв'язок таких властивостей бейнітних чавунів, як твердість, межа плинності, межа міцності на розрив, відносне подовження, ударна в'язкість, межа витривалості та інші, що дозволяє б по даним одних характеристик визначити значення інших. Найчіткіша кореляція спостерігається між твердістю та міцністю, твердістю та ударною в'язкістю (у чавунів із однаковою формою графіту) [7].

### 1.2.1 Технологічні характеристики

Чавуни мають широке розповсюдження як конструкційний матеріал завдяки своїм властивостям. Однак, виробництво вливок із бейнітного чавуну із кулястим графітом потребує проведення сфероїдизуючого графіт модифікування та ізотермічного гартування. Обидва процеси ускладнюють технологію отримання вливок із бейнітного чавуну. Тому технологічність бейнітного чавуну із кулястим графітом не може бути оцінена як висока. Це відноситься і до інших чавунів із кулястим графітом.

Зносостійкість є одним із важливих технологічних параметрів для чавунів, оскільки цей матеріал обирають для деталей, які працюють при високих значеннях навантаження, у вузлах тертя тощо, де інтенсивність зношування дуже висока. Наявність графіту кулястої форми у значній кількості підвищує зносостійкість чавуну, так як це створює додаткові механізми ковзання [7].

Однією з причин недостатньо широкого виробництва та застосування чавунів такого типу є необхідність проведення операції модифікування. У деякій мірі специфічний дефект цих чавунів – чорноти – не сприяє заміні сталі на високоміцний чавун.



Проведення ізотермічного гартування виливок та виробів із чавуну з кулястим графітом додатково ускладнює технологічний процес їх отримання. Менше з тим, прогрес у вдосконаленні технології та обладнання сприяє подальшому розширенню використання в машинобудуванні цього прогресивного матеріалу [7].

У якості позитивних технологічних характеристик бейнітного чавуну, як і інших видів графітизованих чавунів, слід зазначити легку оброблюваність різанням завдяки наявності у структурі чавунів графіту, який виконує роль змащуючого матеріалу.

### 1.2.2 Механічні характеристики

Механічні властивості матеріалів, у тому числі і чавунів, характеризуються такими показниками, як міцність на розрив ( $\sigma_B$ ), межа текучості ( $\sigma_T$ ), видовження ( $\delta$ ), ударна в'язкість (КС), твердість (НВ). Ці характеристики зазвичай називають стандартними, так як вони занесені до державних стандартів на матеріали багатьох країн світу. Окрім цих параметрів, матеріали характеризуються механічними властивостями, які зазвичай не регламентовані у цих стандартах. До них слід віднести міцність при стисканні, межі міцності та плинності при згині, стиску, крученні та зрізі, межа витривалості та інші [7].

Механічні властивості бейнітних чавунів із кулястою формою графіту характеризується широким спектром показників міцності, пластичності, ударної в'язкості тощо. Це обумовлено тим, що мікроструктура бейніту в цих чавунах змінюється у широких межах, оскільки вона суттєво залежить від температури ізотермічного гартування. За температури  $T_{izo} \sim 400$  °С формується верхній бейніт із пластичними  $\alpha$ - та  $\gamma$ -фазами і твердістю близько 300 НВ. Температура  $T_{izo} \sim 250$  °С сприяє формуванню нижнього бейніту. Мікроструктура його настільки дисперсна, що у світловому мікроскопі неможливо її вивчати та аналізувати. Структура нижнього бейніту, що складається із високодисперсних  $\alpha$ - та  $\gamma$ -фаз, із виділенням в  $\alpha$ -фазі дисперсних

включень карбідів при істотній концентрації дислокацій в  $\gamma$ -фазі надає чавуну високі показники міцності (до 1600 МПа) при твердості близько до 450 НВ. Чавун зі структурою верхнього бейніту менш міцний (близько 850 МПа), але пластичніший (до  $\delta \sim 10\%$ ) [7].

Крім того, високому рівню механічних властивостей сприяє й те, що при ізотермічному гартуванні, тобто при фазовому перетворенні без градієнта температур по перерізу гартованого виробу, в матеріалі не утворюються великі внутрішні напруження, що є характерним, наприклад, для металів, загартованих на мартенсит. Високий рівень пластичних властивостей ADI чавунів обумовлюється тим, що в їхній структурі немає крихких фаз. Для досягнення міцності чавуну у 1600 МПа необхідно забезпечити високу ступінь сфероїдизації графіту та відсутність дефектів лиття (пористість, шлакові включення тощо).

Деякі механічні властивості бейнітних чавунів із кулястим графітом по стандарту ASTM 897M [7] (США) наведені у табл. 1.1. У ДСТУ 3925-99 [7] на чавун із кулястим графітом не виділено окремо чавун із бейнітною структурою.

Таблиця 1.1 – Деякі механічні властивості бейнітних чавунів по стандарту ASTM 897M [7]

Марка чавуну	Тимчасовий опір при розтязі $\sigma_B$ , МПа	Умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %	Мікротвердість, НВ
	не менше			
850 550 10	850	550	10	302
1050 700 07	1050	700	7	340
1200 850 04	1200	850	4	387
1400 1100 01	1400	1100	1	418
1600 1300 00	1600	1300	-	460

У табл. 1.2 наведено механічні властивості двох марок чавунів ВЧ 900-2 та ВЧ 1000-2 із найвищою міцністю, які можуть бути названі бейнітними чавунами.

Таблиця 1.2 – Механічні властивості бейнітних чавунів із кулястим графітом для виливок стандарту ДСТУ 3925-99 [7]

Марка чавуну	Тимчасовий опір при розтязі, $\sigma_B$ , МПа	Умовна границя плинності, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Відносне видовження, $\delta$ , %
	не менше		
ВЧ 900-2	900	600	2
ВЧ 1000-2	1000	700	2

Для порівняння стандартів та механічних властивостей чавунів у табл. 1.3 наведено механічні властивості деяких марок бейнітних чавунів із кулястим графітом, що використовуються у Великій Британії/

Таблиця 1.3 – Марки та механічні властивості бейнітних чавунів із кулястим графітом (Велика Британія) [7]

Марка чавуну	Тимчасовий опір при розтязі $\sigma_B$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %
950/6	950 – 1020	6 – 12
1050/3	1050 – 1130	3 – 8
1200/1	1200 – 1300	1 – 6

У табл. 1.4 наведені (з метою порівняння) механічні властивості чавунів із кулястим графітом із феритною, перлітною, мартенситною та бейнітною структурами при різному вмісті залишкового аустеніту (від 20 % до 35 %).

Мікроструктура чавунів може складатися частково із бейніту та мартенситу, та інших структурних складових.

Таблиця 1.4 – Механічні властивості бейнітних чавунів із кулястим графітом з різними структурами [7]

Структура матриці, %	Тимчасовий опір при розтязі $\sigma_B$ , МПа	Умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %	Мікротвердість, НВ	Е, ГПа	Тріщиностійкість $K_{Ic}$ , МПа·м <sup>0,5</sup>
100 Ф	352,0	217,5	25,7	103	176,0	-
100Ф	430,0	307,5	22,4	152	171,0	-
99П	700,5	439,5	2,8	241	169,4	30,3
49П-51Ф	620,5	424,0	12,1	188	177,3	-
Бн (35А)	1009,0	724,0	7,9	273	155,4	-
Бн (35А)	989,0	746,0	5,4	292	152,4	-
Бн (28А)	851,0	635,0	13,1	236	165,3	-
Бн (20А)	1579,0	1242,0	2,8	398	155,4	55,4
100М	945,0	802,3	1,3	269	148,0	45,0

При ізотермічному гартуванні від температур неповної аустенізації, тобто при гартуванні чавуну зі структурою аустеніт-ферит, досягається висока пластичність чавуну, невисока твердість (260 НВ – 290 НВ), хороша оброблюваність та високий рівень інших експлуатаційних характеристик, наприклад, при виготовленні колінвалів із високоміцного чавуну. У табл. 1.5 наведені механічні властивості бейнітних, мартенситних та бейніто-мартенситних чавунів.

Границі міцності ADI чавунів у залежності від виду статичних навантажень складають при стиску 1800 МПа – 2200 МПа, при випробуваннях

на згин 1200 МПа – 1400 МПа, при крученні 700 МПа – 900 МПа та при розтязі 550 МПа – 700 МПа [7].

Таблиця 1.5 – Механічні властивості бейнітних та мартенситних чавунів [7]

Структура матриці	Тимчасовий опір при розтязі $\sigma_B$ , МПа	Умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %	Мікротвердість, НВ	Ударна в'язкість КС <sup>+20°C</sup> , кДж/м <sup>2</sup>
Нижній бейніт	900 – 1300	700 – 1100	3 – 8	280 – 350	300 – 700
Бейніт + мартенсит	700 – 1400	600 – 950	2 – 6	350 – 550	200 – 600
Мартенсит	600 – 900	500 – 800	0,5 – 2	550 – 650	100 – 300
Мартенсит відпуску	600 – 1100	500 – 900	1 – 5	300 – 550	150 – 600

Одним із найважливіших критеріїв оцінки пластичності чавунів є ударна в'язкість. При випробуваннях на ударний згин визначають і температуру в'язко-крихкого переходу по роботі руйнування (різке зниження значення) або по виду поверхні зламу.

Ударна в'язкість бейнітних чавунів залежить від мікроструктури бейніту, а отже від температури ізотермічного витримки. Максимальне значення коефіцієнту ударної в'язкості КС (~ 600 кДж/м<sup>2</sup>) досягається при температурі ізотермічного гартування 320 °С – 360 °С. Із підвищенням цієї температури величина КС зменшується і при 450 °С різко знижується практично до нуля [6].

Режим термічної обробки та хімічний склад значно впливають на статичну та динамічну в'язкість руйнування бейнітних чавунів. Найбільш

високе значення  $K_{IC}$  забезпечується при температурі ізотермічного гартування 300 °С – 350 °С та його тривалості не менше 30 хвилин. При цьому кількість залишкового аустеніту має бути не менше 10 %. При однаковій тривалості аустенізації  $K_{IC}$  зменшується при збільшенні температури аустенізації. Структура нижнього бейніту надає чавуну більш високу тріщиностійкість у порівнянні з верхнім бейнітом.

На рис. 1.3 приведено залежність механічних властивостей ізотермічно загартованого чавуну (3,8 % С; 2,6 % Si; 0,6 % Cu; 0,3 % Mn) від температури ізотермічної витримки при її тривалості 2 год та аустенізації при 900 °С.

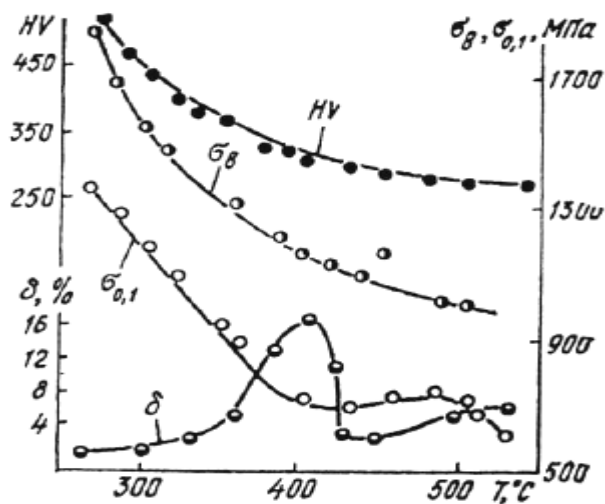


Рисунок 1.3 – Вплив температури ізотермічної витримки на механічні властивості ізотермічно загартованого бейнітного чавуну із кулястим графітом [7]

Вплив температури ізотермічної витримки на властивості ізотермічно загартованого чавуну та кількість аустеніту в структурі чавуну наведено на рис. 1.4.

Висока контактна втомна міцність бейнітних чавунів із кулястим графітом обумовлена ефектом наклепу поверхні та більш низьким модулем пружності у порівнянні зі сталлю (170 ГПа і 210 ГПа відповідно). Зубчаті колеса із бейнітного чавуну із кулястою формою графіту в порівнянні зі сталлю

можуть мати на 10 % менший діаметр при однаковому контактному навантаженні.

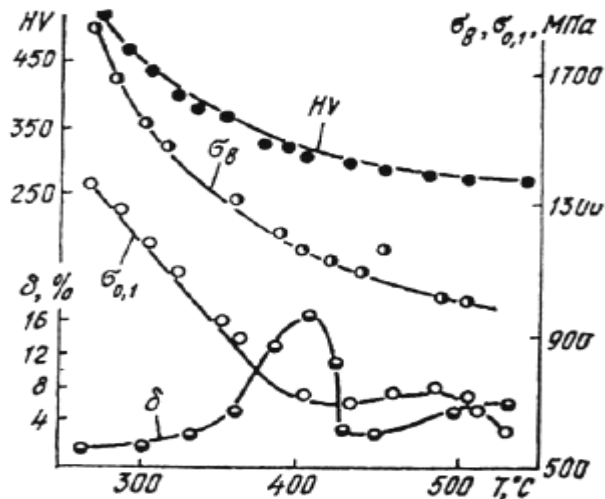


Рисунок 1.4 – Вплив температури ізотермічної витримки на властивості ізотермічно загартованого бейнітного чавуну та кількість аустеніту в його структурі [7]

Висока контактна втомна міцність бейнітних чавунів із кулястим графітом обумовлена ефектом наклепу поверхні та більш низьким модулем пружності у порівнянні зі сталлю (170 ГПа і 210 ГПа відповідно). Зубчаті колеса із бейнітного чавуну із кулястою формою графіту в порівнянні зі сталлю можуть мати на 10 % менший діаметр при однаковому контактному навантаженні.

Границя витривалості бейнітних чавунів із кулястим графітом по даним різних досліджень дорівнює:

- стиск – розтяг із постійною амплітудою – 380 МПа;
- згин із обертанням – 450 МПа;
- реверсійний згин – 425 МПа;
- реверсійний згин бруска, прокатаного після термообробки та обробки різанням – 620 МПа.

Границі витривалості таких бейнітних чавунів марки ВЧ 100 при згині, розтязі та крученні дорівнюють відповідно 280 МПа – 400 МПа, 240МПа - 400 МПа та 220 МПа – 300 МПа. Границя витривалості підвищується зі збільшенням статичної міцності [7]. У зубчатих колесах із чавуну зі структурою верхнього бейніту витривалість складає близько 330 МПа без наклепу та 530 МПа із наклепом після дробоструменевої обробки. Максимальна контактнo-втомна міцність досягається у чавунів зі структурою нижнього бейніту (1020 МПа – 1260 МПа), що вище, ніж у багатьох сталях (легованих, азотованих), але нижче, ніж у цементованих сталей.

### 1.3. Демпфування як механічна характеристика

Внутрішнє механічне демпфування (або внутрішнє тертя) матеріалу вже давно використовувалися вченими-дослідниками, зацікавленими в дефектах матеріалів та їх вплив на механічні властивості. Внутрішнє тертя визначається як здатність матеріалу перетворювати свою механічну енергію вібрації в тепло, що розсіюється в матеріалі [8]. Добре відомо, що багато в'язкопружних матеріалів (каучуків, полімерів і пластиків) мають здатність гасити шум і вібрацію.

Потужність демпфування є показником здатності матеріалу розсіювати енергію пружної деформації під час механічної вібрації або поширення хвилі. Відповідно до потужності (ступеню) демпфування, матеріали можуть бути класифіковані на високі та низькі. Матеріали з низькою демпфуючою здатністю можуть бути використані в музичних інструментах, де потрібна стійка механічна вібрація і поширення акустичних хвиль. І навпаки, високодемпфіруючі матеріали є цінними для гасіння вібрації шумів, і для стабільності чутливих систем та приладів. Застосування високодемпфуючих матеріалів у конструкціях може усунути необхідність використання спеціальних пристроїв активного контролю, а також може сприяти економії ваги загальної конструкції [9].



Загалом, металеві матеріали мають відносно низький рівень погасання. Це менш оптимальне гасіння, яке проявляють поширені метали та сплави, спонукало дослідників вивчати можливість поліпшення демпфуючих характеристик конструкційних матеріалів шляхом модифікації мікроструктури з використанням інноваційної обробки.

На жаль, високодемпфуючі метали часто не мають відповідних високих фізичних і механічних властивостей, що робить їх непридатними для застосування у багатьох видах конструкцій. Наприклад, високовуглецеві чавунні листи демонструють відносно високе демпфування, але його висока щільність і крихкість обмежують його застосування [9].

Демпфуючі характеристики металу можна визначити шляхом циклічного навантаження, яке включає навантаження та розвантаження зразка. Розуміння цього ефекту можна отримати від спостереження діаграми напруги-деформації з перебільшеними ознаками (див. рис. 1.5) [9].

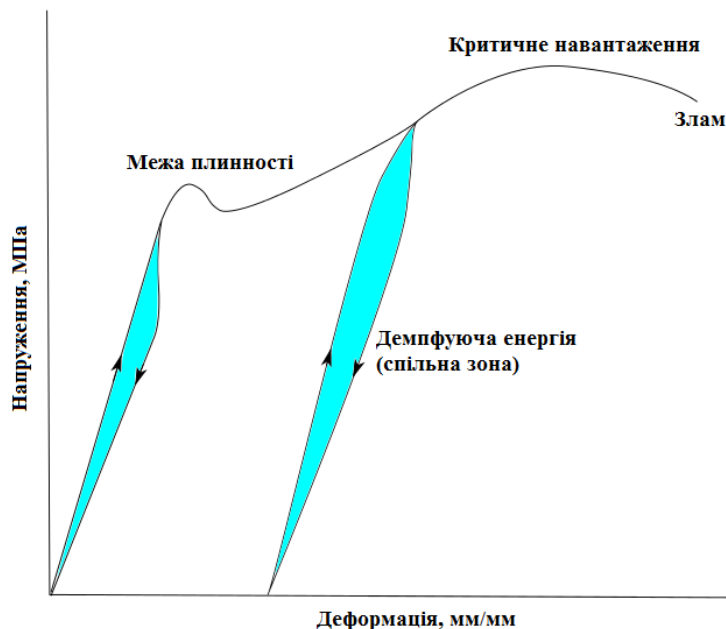


Рисунок 1.5 – Діаграма «напруження-деформація» з деформаційними петлями [9]

У випадку утворення псевдопружних петель, які характеризують розсіяння енергії при деформації, схильність до демпфування може бути охарактеризована відносною здатністю деформованого матеріалу накопичувати пружну енергію за рахунок пружного двійникування, як відношення площі петлі до подвоєного амплітудного значення пружної енергії [10].

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{(\int_0^{\varepsilon_{a+\varepsilon_0}} \sigma l(\varepsilon) - \int_0^{\varepsilon_{a+\varepsilon_0}} \sigma u(\varepsilon)) d\varepsilon}{\int_{\varepsilon_{a+\varepsilon_0}}^0 \sigma l(\varepsilon) d\varepsilon} \quad (1.1)$$

де  $\Delta W$  – енергія затрачена на передвійникування;

$W$  – загальна питома пружна енергія, що накопичується матеріалом.

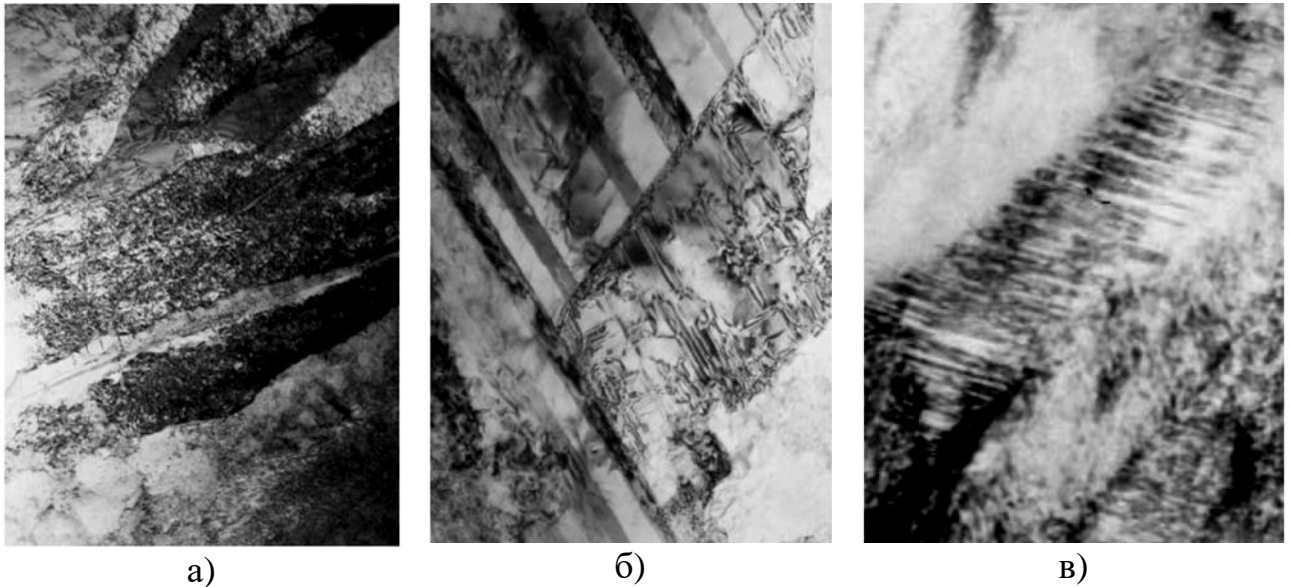
Існує багато методів визначення внутрішнього тертя. Однак у наведених дослідях використовувався саме той, що наведено вище.

#### 1.4 Механізм зміцнення ADI

ADI чавуни можуть мати широке застосування саме завдяки своїй унікальній структурі. Основними складовими матриці ADI чавунів є ферит і аустеніт, збагачений вуглецем (з можливістю деяких мартенситних утворень при низьких температурах). Обидві складові мають низьку або середню міцність. Питання високої міцності таких чавунів, і те, яким саме механізмом вона забезпечується у таких матеріалах раніше пов'язували з твердненням осаду, що виникає при утворенні сполук малої кількості, таких як карбіди типу  $M_6C$  та ін. Однак, щільність цих осадів, є занадто низькою, щоб привести до таких високоякісних властивостей міцності. Завдяки використанню СЕМ, авторам [6] вдалося дізнатися більше про механізми зміцнення основних структурних складових ADI чавунів (рис. 1.6).

Механізм зміцнення фериту пов'язують з деформаційним зміцненням, яке є результатом дуже високої щільності дислокацій, що супроводжується високою щільністю дуже малих дислокаційних петель. У той же час зміцнення

аустеніту обумовлено механізмом тверднення розчину, підтримуваним рафінуванням зерна за рахунок двійникування, що призводить до додаткового збільшення когерентності меж зерен.



а) феритні пластини (х 22000); б) аустенітні зерна з двійниковими дислокаціями (х 35000); в) когерентні границі двійників всередині мартенситних пластин (х 140000)

Рисунок 1.6 – Електронномікроскопічні зображення структури ADI чавуну [6]

Крім того, перетворення аустеніту і мартенситу при низькій температурі випромінювання супроводжується високим спотворенням решітки і, отже, високою енергією деформації. Зерна мартенситу будуть розділені на дуже велику кількість ультратонких структур. У результаті величезна кількість когерентних меж зерен перешкоджатиме руху дислокацій [6].

## 1.5 Висновки до розділу 1

1. Показано, що чавуни з бейнітною структурою можуть мати необхідний рівень експлуатаційних властивостей для використання як ріжуча кромка деталей сільськогосподарської техніки.

2. ADI чавуни мають достатньо високий рівень механічних характеристик, що важливо для ефективної експлуатації в умовах циклічних стискаючих навантажень. Проте, чавуни є досить крихкими, що не дозволяє повністю використовувати демпфуючу здатність для запобігання руйнуванню при різкій зміні параметрів навантаження. Проведення необхідної термічної обробки бейнітного чавуну може покращити його механічні та технологічні характеристики.

## 2 МЕТОДИКА ТА ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Обґрунтування вибору об'єкта дослідження

Для робочих частин деталей ґрунтооброблюваної техніки — лемеші плугів, лапи культиваторів, диски плугів, тощо (рис. 2.1), — зазвичай використовуються сталі типу Л53, 65Г, 45. Для підвищення їх зносостійкості використовується поверхневе гартування, гартування в масло, наплавка ріжучої кромки твердосплавними композиціями. До недоліків деталей вітчизняного виробництва слід віднести їх недостатню зносостійкість, особливо при обробці важких ґрунтів, що погіршує якість роботи. Зарубіжні аналогічні матеріали мають ресурс у 2 – 2,5 рази більший, при цьому їх собівартість у 3 – 5 разів вища [1].



а)

б)

Рисунок 2.1 — Зовнішній вид лемешів плугів (а)

та лап культиваторів (б) [1]

Саме тому на заміну було запропоновано ADI чавун, адже цей матеріал найкраще підходить для задоволення відповідних та необхідних технологічних характеристик, як висока зносостійкість та міцність. Попередні дослідження [11] показали, що деталі із такого чавуну мають більший ресурс на зношування і здатні витримувати інтенсивні навантаження навіть при

підвищеній температурі роботи, що пояснюється наявністю фазового переходу під дією навантаження. Так званий TRIP-ефект (фазове перетворення під дією деформації), властивий більш для сталей, проявляється і в аустенізованих бейнітних чавунах із кулястим графітом (ADI чавуни) із залишковим аустенітом у структурі. При дії навантаження залишковий аустеніт приповерхневих шарів перетворюється у мартенсит [11]. Тобто, перебудова структури поверхневих шарів вносить вагомий внесок у міцність матеріалу.

ADI чавуни вже почали застосовувати із за кордоном, також як матеріал для елементів сільськогосподарської техніки (рис. 2.2) [12].



а)



б)

а) зерновий дефлектор; б) деталь обертання комбайна

Рисунок 2.2 – Вироби із ADI чавуну [12]

На рис. 2.2 (а) показано зерновий дефлектор (відбивач) для комбайна, зроблений із ADI чавуну. Таку складну форму майже неможливо виробляти будь-яким іншим способом, окрім лиття. Зносостійкість, пропонована ADI матеріалом, дозволяє витримувати абразивний потік зерна, що набагато підвищує ресурс деталі та є економічно вигідним фактором. Фотографія на рис. 2.2 (б) демонструє деталь обертання комбайну [12].

Деталі з бейнітного високоміцного чавуну на 10 %... 15 % легше аналогічних сталевих і на 30 % дешевше у виготовленні. Наприклад, молотки

для помелу керамічних мас приблизно в три рази перевищують зносостійкість молотків із сталі 110Г13 Л [13].

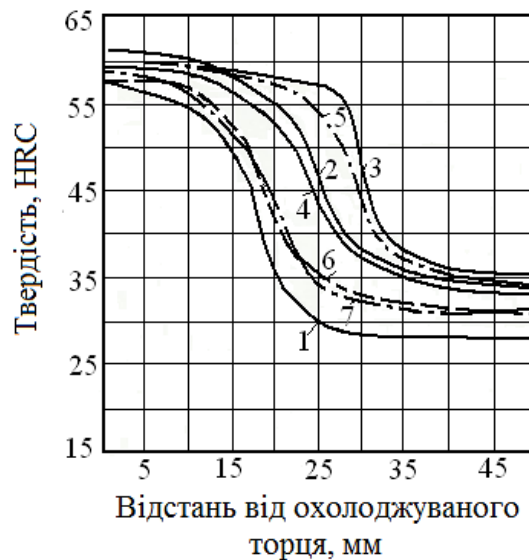
На сьогодні невідомий механізм формування такої структури, яка визначає властивості та характеристики ADI чавунів. Тому цей напрям особливо цікавий для досліджень.

## 2.2 Отримання бейнітного високоміцного чавуну із кулястим графітом

Тривалість аустенізації визначається в залежності від товщини відливок, характеристик термічного устаткування, вихідного фазового складу і структури чавуну, а також вибраної температури аустенізації. Вищій температурі аустенізації відповідає менша витримка і навпаки. Звичайний час витримки при аустенізації складає від 0,5 до 2 годин. Температура аустенізації вища за 1000 °C не застосовується, оскільки веде до зростання зерна і грубіння структури після гартування і, відповідно, до зниження механічних властивостей [1].

Формування структури металевої матриці чавуну при ізотермічному гартуванні залежить, головним чином, від температури розпаду переохолодженого аустеніту, а також хімічного складу, тобто хімічний склад і режим ізотермічного гартування взаємозалежні. Температура аустенізації повинна перевищувати точку  $A_{C1}$  на 20 °C... 30 °C. Тривалість витримки ізотермічного гартування також, як і температура аустенізації, залежить від легування та модифікування [14].

Найбільш ефективно підвищують прогартуваність невеликі добавки таких металів як Mo, Cu, Ni, Mn, а також у незначній мірі модифікатори, перш за все Mg. На рисунку 2.3 представлені криві прогартуваності високоміцного чавуну в залежності від легування різними елементами.



1 – нелегований чавун ( $C_{\text{заг}} = 3,3 \%$ ;  $Si = 2,7 \%$ ;  $P = 0,11 \%$ ;  $S = 0,005\%$ ;  $Mg = 0,045\%$ ); чавун із вмістом: 2 –  $0,22\% Cu$ ; 3 –  $0,24\% Ni$ ; 4 –  $0,25\% Mg$ ; 5 –  $0,48\% Cu$

Рисунок 2.3 – Криві прогартуваності високоміцного чавуну із кулястим графтом із температурою гартування  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  [14]

У світовій практиці для отримання високоміцного чавуну знайшли застосування різноманітні модифікатори, починаючи від чистого магнію, церію, мишметалу, лігатур  $Mg-Ni$ ,  $Mg-Ni-PЗМ$ ,  $Mg-Ni-Fe$ ,  $Mg-Ni-Cu$ ,  $Mg-Si-Fe$ ,  $Mg-Si-Fe-PЗМ$  та ін. Подібна різноманітність викликана різним впливом компонентів, що входять у модифікатори на структуроутворення високоміцного чавуну при кристалізації, а також різною живучістю модифікаторів, тобто здатністю зберігати модифікуючий ефект із часом [1].

Мета модифікування — зміна ступеня графітизації, розмірів, розподілу і форми графітних включень, шляхом зміни числа або умов зростання зародків [14]. При цьому, в залежності від характеру впливу на структуру чавуну, елементи умовно класифікуються на графітуючі, стабілізуючі та сфероїдируючі.

Основна ідея графітуючого модифікування — збільшення кількості зародків графіту, у яких швидкість росту при твердненні чавуну однакова у всіх напрямках і зменшення переохолодження при затвердінні рідкого чавуну. Це



відбувається шляхом створення або активації в рідкому металі включень або комплексів, що можуть стати зародками при відповідному порівняно невеликому переохолодженні. Швидкість росту залежить від багатьох факторів, у тому числі від характеру середовища, температури, швидкості охолодження, поверхневих і адсорбційних явищ, і т.д [1].

Сфероїзатори графіту відносяться до поверхнево-активних елементів, які знижують поверхневий натяг розчинника [15]. Однак ця закономірність спотворюється через наявність у чавуні сірки і кисню — ще більш поверхнево-активних елементів. Тому в процесі підвищення вмісту сфероїзаторів у чавуні його поверхневий натяг спочатку зростає до  $500 \text{ мДж/м}^2 \div 1600 \text{ мДж/м}^2$  в результаті видалення з розплаву сірки і кисню при введенні  $0,02 \% \div 0,05 \% \text{ Mg}$  або  $0,3 \% \div 0,4 \% \text{ PЗМ}$ , а після перевищення цієї межі — знижується [16].

У практиці виробництва виливків із високоміцного чавуну в якості сфероїдизуючих модифікаторів найбільшого поширення поряд із металевим магнієм отримали магнієвмісні лігатури різного складу. Вміст магнію в них знаходиться зазвичай у межах  $3 \% \div 20 \%$ , основою може бути кремній і залізо, нікель, мідь, нікель і мідь, нікель і кремній тощо. [17]. До складу цих лігатур у більшості випадків входить також кальцій, РЗМ (рідкоземельні метали), барій, алюміній, і (або) інші активні добавки, які мають позитивний вплив на властивості модифікованого чавуну. Рідше застосовується металевий ітрій і сплави на основі РЗМ.

Найбільш широко розповсюджені комплексні композиційні модифікатори, які містять  $4,5 \% \div 8 \% \text{ магнію}$ ,  $4 \% \div 7 \% \text{ кальцію}$ ,  $1 \% \div 3 \% \text{ РЗМ}$ ,  $1 \% \div 3 \% \text{ барію}$ ,  $5 \% \div 17 \% \text{ алюмінію}$ , кремнію, заліза та ін. Зазначені модифікатори виготовляються у вигляді зливків плавленням відповідних компонентів [18].

Випробуванням піддавалися зразки (рис. 2.4), виготовлені литтям із наступного складу чавуну:  $3,2 \% \dots 3,4 \% \text{ C}$ ;  $1,4 \% \dots 1,6 \% \text{ Si}$ ;  $0,2 \% \dots 0,3 \% \text{ Mn}$ ;  $0,01 \% \dots 0,02 \% \text{ Cr}$ ;  $0,18 \% \text{ Mo}$ ;  $0,3 \% \text{ Cu}$ ;  $0,4 \% \text{ Ni}$ ;  $0,02 \% \text{ P}$ ;  $\text{S} < 0,02 \%$ ;

модифікатори: 7,5 % Mg, 35 % СК25, 17 % Al, 9 % SiBa (20 % Ba), 17,5 % Fe, 12 % модифікатор-флюс «Рефтокон» та 9 % РЗМ (ФС30РЗМ30) [1].

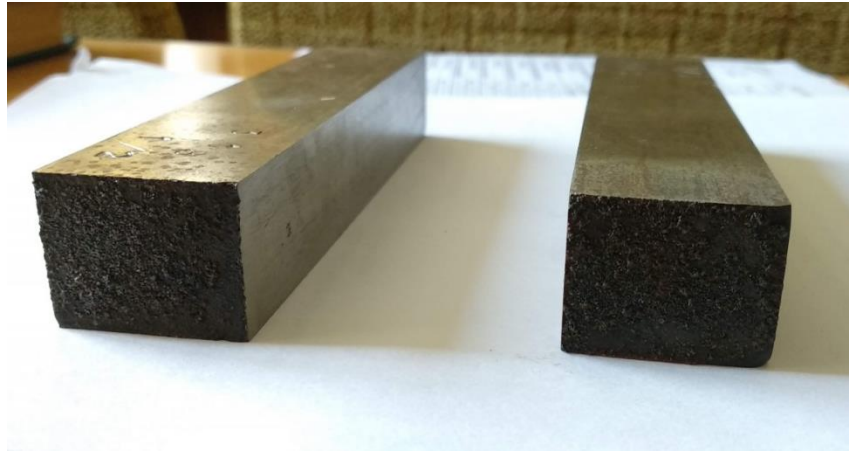


Рисунок 2.4 – Виливки бейнітного чавуну для досліджень

Термічна обробка проводилась на виготовлених із виливків зразків розміром 55 мм × 10 мм × 10 мм, та полягала в аустенізації при температурі 900 °С протягом 30 хвилин у печі СНОЛ 6,7/1300 (рис. 2.5, а). Після цього зразок (рис. 2.6, а) занурювали в олов'яну ванну (рис. 2.6, б) для подальшого ізотермічного гартування у печі СНОЛ-1,6.2,5.1.11-ИЗ (рис. 2.5, б) при 280 °С, 300 °С, 310 °С, 350 °С та 400 °С протягом 2 години.



а)



б)

Рисунок 2.5 – Обладнання для термічної обробки



а)



б)

Рисунок 2.6 – Зображення аустенізованого зразка та олов'яної ванни

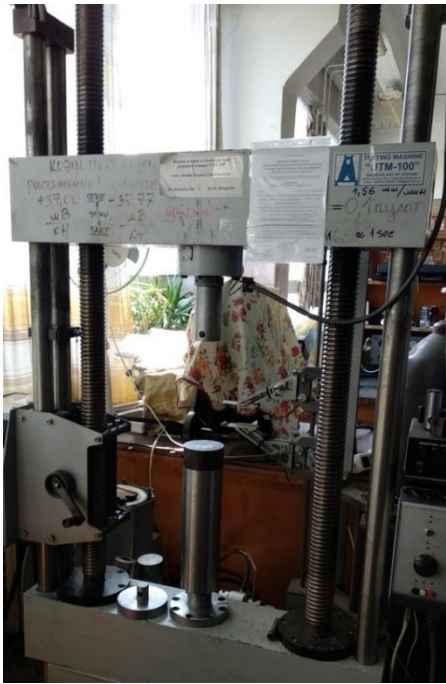
Результатом такої термічної обробки є процес фазового перетворення аустеніту в бейніт в матеріалі, що забезпечує покращення міцності завдяки наявності кулястого графіту.

### 2.3. Методи дослідження бейнітного чавуну

#### 2.3.1 Випробування на одновісний розтяг

На випробування одновісного розтягу бралися циліндричні зразки із ADI чавуну з довжиною робочої частини  $30 \text{ мм} \div 40 \text{ мм}$  та діаметром 5 мм. Зразки мали спеціальні закінцівки для фіксування в кулачках (захватах) розривної машини “UTM-100” (рис. 2.7) для закріплення в силовому ланцюзі. Захвати забезпечують жорстке кріплення та нерухомий стан зразка при навантаженні. Тяги через систему шарнірів запобігають перекосу в ланцюзі навантаження.

Швидкість переміщення траверси для машини “UTM-100” становить від 0,04 мм/хв. до 150 мм/хв., похибка вимірювання зусилля не перевищує  $\pm 0,5 \%$ . Межі допустимого значення абсолютної похибки видовження від 0 мкм до 200 мкм –  $\Delta = \pm 2 \text{ мкм}$ , від 0 мкм до 2000 мкм –  $\Delta = \pm 20 \text{ мкм}$ .



а)

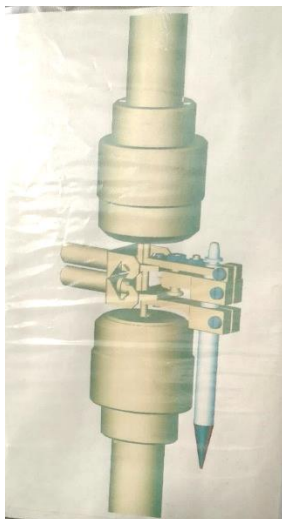


б)

а) розривна машина “UTM-100”; б) кулачки для закріплення зразка

Рисунок 2.7 – Обладнання для випробувань на одновісний розтяг

Значення переміщення фіксувалися спеціальним датчиком (рис. 2.8), які виводилися на персональний комп'ютер.



а)



б)

а) схематичне зображення; б) сам датчик

Рисунок 2.8 – Датчик переміщення зразка

Безпосередньо в процесі випробувань записуються діаграми розтягу зразка в координатах «навантаження – видовження». Для полікристалічних матеріалів всі можливі форми цих кривих можна розділити на три типи (рис. 2.9) [19].

Діаграма типу I характерна для зразків, що руйнуються без суттєвої пластичної деформації. Діаграма типу II характерна для зразків, що рівномірно деформуються аж до руйнування. Діаграма типу III є найпоширенішою і характерна для зразків, в яких перед руйнуванням відбувається локалізація пластичної деформації – формується «шийка».

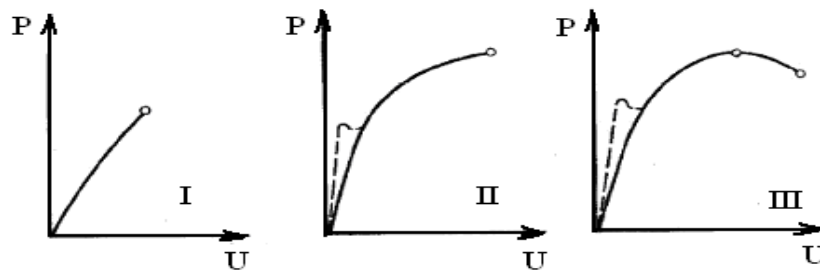


Рисунок 2.9 – Типи первинних діаграм випробувань зразків на одновісний розтяг [19]

Ці діаграми є вихідними для побудови діаграм деформації та визначення характеристик міцності та пластичності, які в залежності від методики обробки експериментальних даних поділяються на умовні та істинні. Відмінність між істинними та умовними діаграмами полягає в тому, що перші побудовані в координатах «істинне напруження ( $S$ ) – істинна деформація ( $e$ )», а другі – в координатах «умовне напруження ( $\sigma$ ) – відносне видовження ( $\delta$ )».

В умовах одновісного розтягу істинні напруження завжди перевищують умовні, оскільки при їх визначенні враховується зменшення площі поперечного перерізу зразка [19].

Проте, за малих пружно-пластичних деформацій істинні та умовні напруження практично співпадають. В області деформацій за межею плинності істинні та умовні діаграми суттєво відрізняються. Це обумовлено тим, що істинні діаграми характеризують механічні властивості матеріалу, а умовні слугують лише для їх оціночного (попереднього) виявлення.

Механічні властивості матеріалу при деформаціях поза межею плинності характеризуються [20]:

- межею міцності  $\sigma_B$ ;
- показником деформаційного зміцнення  $n$ ;
- рівномірною деформацією  $\epsilon_p$ ;
- істинним  $S_k$  та умовним  $\sigma_k$  напруженнями руйнування;
- відносним звуженням  $\Psi$ .

Межа міцності (або тимчасовий опір руйнуванню)  $\sigma_B$  – рівень напружень, який відповідає точці  $P_{max}$  на діаграмі розтягу зразка. За цього навантаження починається утворення «шийки», тобто відбувається локалізація пластичної деформації в певному перерізі зразка. Відповідно до визначення, межу міцності розраховують як [20]:

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}, \quad (2.1)$$

де  $P_{max}$  – максимальне навантаження на діаграмі розтягу зразка;

$F_0$  – площа поперечного перерізу зразка у вихідному стані.

### 2.3.2 Випробування зразків на удар без надрізу

Ударна в'язкість — здатність матеріалу поглинати механічну енергію в процесі деформації та руйнування під дією ударного навантаження. Як правило, оцінюється роботою, що виконана для руйнування надрізаного зразка при ударному згині, віднесеною до площі його перерізу в місці надрізу. Вимірюється в Дж/м<sup>2</sup> або кгс·м/см<sup>2</sup> [21].

Найчастіше проводять випробування при ударному згині зразків прямокутного перерізу з надрізом посередині. Наявність надрізу, створюючи концентрацію напружень, сприяє руйнуванню матеріалу зразка навіть пластичного матеріалу. У цьому випробуванні для досліджуваного матеріалу надріз не виконувався, так як бейнітний чавун сам по собі матеріал крихкий.

Метод випробування за Шарпі полягає у випробуванні, при якому зразок, що лежить на двох опорах, зазнає удару маятника, причому лінія удару знаходиться посередині між опорами [22]. Випробування на ударний згин проводилися на маятниковому копрі типу МК-0,5 (рис. 2.10). Номінальне значення потенціальної енергії маятника має бути таким, щоб значення роботи удару складала не менше 10 % від номінального значення потенціальної енергії маятника [22].



Рисунок 2.10 – Копр маятниковий типу МК-0,5

Повну роботу копра, витрачену на ударне руйнування зразка, визначають як різницю між його початковою і кінцевою (після удару) потенційними енергіями.

Перед випробуванням маятник піднімають на визначену висоту  $h'$  і фіксують його на рамі у положенні «зарядка» під кутом  $\alpha$  (рис. 2.11). У цьому положенні маятник має деякий запас енергії  $U_0$ . Якщо відпустити маятник він після падіння під дією сили ваги зруйнує встановлений на опорах зразок [21]. Зупинка копра після руйнування зразка здійснюється гальмом, коли, злетівши після руйнування зразка, маятник знову почне падати, гальмо зупинить його.

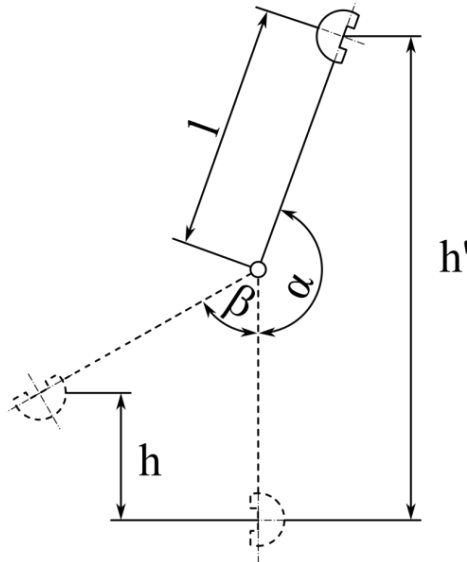


Рисунок 2.11 – Розрахункова схема для визначення ударної в'язкості [21]

Маятник, маючи запас енергії, що залишився,  $U_0$ , може піднятися на висоту  $h$  на кут  $\beta$  (див. рис. 2.11) по іншу сторону стійок. Якщо знехтувати невеликою втратою енергії на тертя в підшипниках, то роботу, витрачену на руйнування зразка, можна визначити з виразу [21]:

$$W = U_0 - U_1 = P \cdot (h' - h), \quad (2.2)$$

де  $P$  – вага маятника.

Враховуючи довжину маятника  $l$  [23]:

$$\begin{aligned} h' &= l \cdot (1 - \cos \beta), \\ h &= l \cdot (1 - \cos \alpha). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Отже:

$$W = P \cdot l \cdot (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (2.4)$$

Ударна в'язкість визначається як відношення роботи, витрачену на злам зразка  $W$  до площі ослабленого надрізом перерізу зразка  $F$  [23]:



$$KC = \frac{W}{F}. \quad (2.5)$$

Частина енергії удару витрачається на струс копра і фундаменту, подолання опору повітря, на тертя в підшипниках і у вимірювальному пристрої, на зминання зразка на опорах і під ножем, на передачу енергії уламкам зразка і на пружну деформацію штанги маятника [24]. На копрах, застосовуваних протягом звичайних випробувань металів, більшість цих втрат не піддається обліку, у результаті одержувані значення роботи виявляються завищеними на кілька відсотків. Особливо великі втрати енергії при розбіжності осі удару і середини надрізу на зразку. Тому величини ударної в'язкості, визначені на різних копрах, можуть відрізнятися один від одного на 10 %... 30 %. Точність визначення роботи зламу є тим вищою, чим менше перевищення запасу роботи маятника над роботою деформації і руйнування зразка. Тому випробування необхідно проводити із забезпеченням мінімального кута  $\beta$  після руйнування зразка [25].

Для цього випробування бралися зразки розміром 55 мм × 10 мм × 10 мм без надрізу загартовані при 310 °С, 350 °С та 400 °С. Гранична енергія маятника копра не перевищувала 300 Дж згідно зі стандарту ДСТУ EN 10045-1:2006 [25].

### 2.3.3 ДюрOMETричний аналіз

Під мікротвердістю розуміють твердість матеріалу в мікроскопічних об'ємах. Вимірювання мікротвердості у даній роботі має на меті визначення твердості поверхневого шару зразка [20].

Вимірювання мікротвердості проводиться за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3, зображеного на рис. 2.12. Вимірювання мікротвердості проводиться шляхом вдавнення стандартної алмазної пірамідки з квадратною основою і двограним кутом при вершині 136° при навантаженні 50 г протягом 10 с ÷ 15 с.



Рисунок 2.12 – Зовнішній вигляд мікротвердоміра ПМТ-3 [20]

Найбільша похибка окуляр-мікрометра у всьому діапазоні вимірювань складає  $\pm 2$  мкм у відповідності до паспорту.

Мікротвердість (у МПа) визначається як співвідношення навантаження до площі поверхні відбитка індентора, і в разі використання індентора Віккерса розраховується за формулою [20]:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \sin \alpha / 2}{d^2} = 0,189 \frac{F}{\langle d \rangle^2}, \quad (2.6)$$

де  $F$  – нормальне навантаження, прикладене до індентора, Н;

$S$  – умовна площа бокової поверхні відбитка індентора;

$\alpha$  – кут при вершині індентора ( $136^\circ$ );

$\langle d \rangle$  – середнє арифметичне значення довжини обох діагоналей відбитка, що в свою чергу розраховується за формулою:

$$\langle d \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n (d_{i1} + d_{i2})}{2n}, \quad (2.7)$$

де  $d_{i1}$  і  $d_{i2}$  — відповідно довжина діагоналей чотирикутного відбитка;

$n$  — кількість вимірювань.

Похибка вимірювання середнього арифметичного значення довжини діагоналей відбитка  $\sigma_0$  визначається за формулою [20]:

$$\sigma_0 = \left( \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \langle d \rangle - \left( \frac{d_{i1} + d_{i2}}{2} \right) \right)^2}{n-1}} \right) / n \quad (2.8)$$

Відносна похибка вимірювання  $\delta H_\mu$  визначається [20]:

$$\delta H_\mu = \left| \frac{H_\mu \langle d \rangle - H_\mu (\langle d \rangle \pm \sigma_0)}{H_\mu \langle d \rangle} \right| 100\% \quad (2.9)$$

Абсолютна похибка [20]:

$$\Delta H_\mu = H_\mu \langle d \rangle - H_\mu (\langle d \rangle \pm \sigma_0) \quad (2.10)$$

#### 2.3.4 Квазістатичний метод визначення демпфуючих властивостей

Як відомо, динамічні навантаження в елементах конструкцій відбуваються з відносно малою частотою, але при достатньо великих навантаженнях. Тому у дослідженні демпфуючих властивостей було запропоновано використання квазістатичного методу [26]. В основі цієї методики лежить статичне випробування зразка на одновісний розтяг із пульсуючим циклом «навантаження – розвантаження» на різних ділянках кривої зміцнення та реєстрацією квазіпружних гістерезисних петель, площа яких характеризує здатність матеріалу розсіювати енергію. Обраний метод є особливо цікавим для матеріалів, що у яких відбувається фазове перетворення під дією деформації. Розглядаючи даний випадок – мартенситне перетворення, – то кількість мартенситу змінюється під час деформування та залежить від

структурного стану матеріалу, який визначається температурою попереднього ізотермічного гартування.

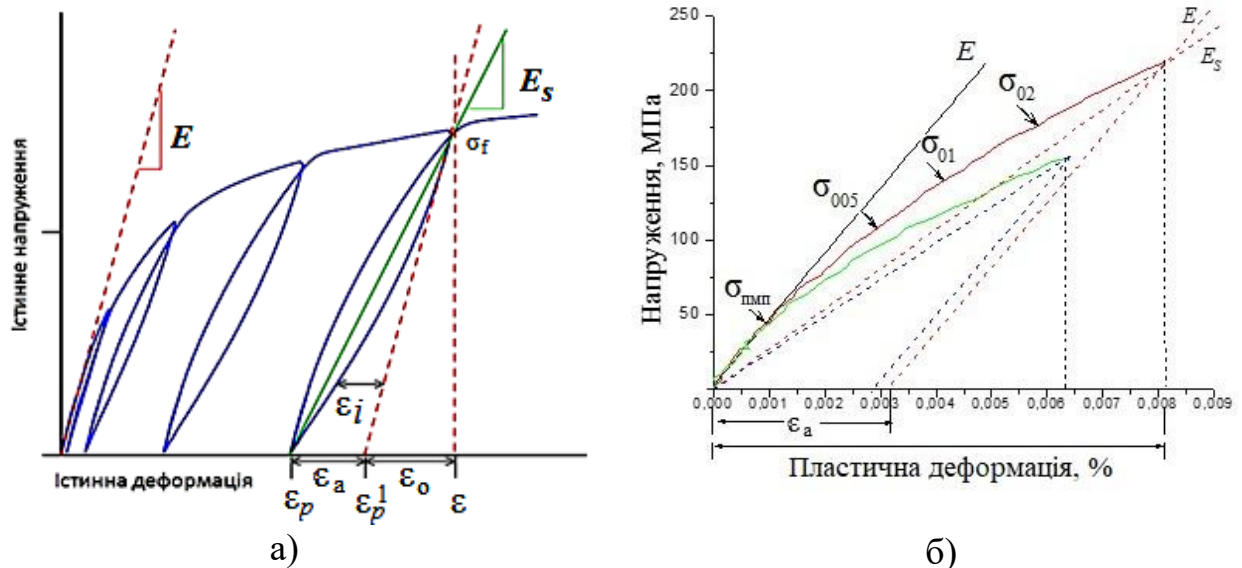
Для проведення експерименту були підготовлені зразки для механічних випробувань у формі циліндра з діаметром 3 мм та довжиною робочої частини  $l_0 = 15$  мм. Випробування на розтяг виконувалися згідно зі стандарту ДСТУ EN10002 – 1:2006, зі швидкістю деформації  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  на розривній машині “UTM-1000”. Видовження фіксувалося тензометричним датчиком безпосередньо з робочої частини зразка. Конструкція тензометра дозволяла вимірювати деформацію зразка при кімнатній та підвищених температурах із чутливістю за деформацією не гірше  $2 \cdot 10^{-5}$  та вимірювати модуль пружності з похибкою не більше 2 %.

Демпфуючу здатність матеріалу визначали з експериментів на розтяг методом вимірювання статичної петлі гістерезису [26]. Для отримання гістерезисної петлі, зразок після певної пластичної деформації повністю розвантажувався до  $\sigma = 0$  з такою ж швидкістю, як і при навантаженні, після чого повторно навантажувався з цією ж швидкістю. Ця операція повторювалась багаторазово при різних попередніх деформаціях. На рис. 2.13 схематично зображена деформаційна крива з гістерезисними петлями, де  $E$  — модуль пружності,  $\sigma_f$  — деформуєче напруження на початку розвантаження,  $\varepsilon$  — повна деформація,  $\varepsilon_p$  — істинна пластична деформація;  $\varepsilon_i$  — псевдопружна деформація при розвантаженні;  $\varepsilon_a$  — повна псевдопружна деформація;  $E_s$  — ефективний модуль Юнга.

Враховуючи симетричний характер гістерезисної петлі, по кривим наведеним на рис. 2.13 достатньо просто розрахувати такі традиційні характеристики псевдопружності, які запропоновані в роботах [28 – 30]:

- псевдопружну деформацію  $\varepsilon_i$ ,
- пружну деформацію  $\varepsilon_0$ ,
- повну деформацію  $\varepsilon_a + \varepsilon_0$ ,
- ефективний модуль Юнга  $E_s$ ,

а також проводити порівняльний аналіз цих параметрів. Крім того, на лінійній ділянці кожної псевдопружної петлі можна визначити модуль пружності  $E$ , та прецизійну границю пружності ( $\sigma_{0,002}$ ), яка відповідає початку відхилення від класичної (лінійної) пружності.



а) деформаційна крива; б) висхідні ділянки петель

Рисунок 2.13 — Схематичне представлення розрахунку деформаційної кривої з гістерезисними петлями [27]

Для розрахунку псевдопружної складової від сумарної деформації віднімалась пластична складова,  $(\epsilon - \epsilon_p)$  (рис. 2.13). Оскільки, пружна складова деформації зразка, значно перевищує псевдопружну, для прецизійного дослідження зміни напруження в області псевдопружності з отриманих діаграм «напруження – деформація» псевдопружна складова виокремлювалась шляхом віднімання значення пружної деформації для кожного прикладеного напруження.

Найбільш застосованою характеристикою внутрішнього тертя є величина  $\psi$ , що являє собою відношення розсіяної енергії протягом одного циклу до збереженої енергії від початку навантаження до максимуму [9]:

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (2.11)$$

де

$$\Delta W = \oint \sigma d\varepsilon, \quad (2.12)$$

$$W = \int_{\omega t=0}^{\omega t=n/2} \sigma d\varepsilon. \quad (2.13)$$

Насправді, для періодичного навантаження на матеріал, деформація якого описується рівнянням (2.7), вирази для визначення напружень ( $\sigma$ ) та видовження ( $\varepsilon$ ) мають вигляд:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{i\omega t}, \quad (2.14)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (2.15)$$

де  $\sigma_0$  та  $\varepsilon_0$  – амплітуди відповідно напруження і видовження матеріалу;

$\omega = 2\pi f$  – циклічна частота;

$f$  – частота коливань;

$\varphi$  – кут втрат, за яким деформація відстає від напруження.

Отриманий комплексний модуль визначається як [11]

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos\varphi + i\sin\varphi) = E' + iE'' \quad (2.16)$$

де

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin\varphi \quad (2.17)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos\varphi \quad (2.18)$$

де  $E'$  – модуль збереження, а  $E''$  – модуль втрат.

### 2.3.5 Фрактографічний аналіз поверхні

Фрактографія – область знань для аналізу характеру руйнування та встановлення зв'язку між механізмами розвитку тріщини і характеристиками пружного стану зразків. Вид зламу (в'язкий, крихкий, втомний) це основний критерій якості матеріалу.

Фрактографічний аналіз виконували на поверхнях зламу, отриманих після механічних випробувань зразків. Для цього використовували скануючий електронний мікроскоп SEM-2000 (рис. 2.14)



Рисунок 2.14 – Скануючий електронний мікроскоп

Принцип дії СЕМ мікроскопа ґрунтується на використанні деяких ефектів, що виникають при опромінюванні поверхні об'єктів тонкосфокусованим пучком електронів — зондом. Унаслідок взаємодії електронів із зразком (речовиною) генерується низка сигналів. Основними з них є потік електронів: відбитих, вторинних, Оже-електронів, поглинених, тих, що пройшли через зразок, а також випромінювань: катодолюмінесцентного і рентгенівського [31].

Для отримання зображення поверхні зразка використовуються вторинні, відбиті та поглинені електрони. Решта компонентів віддачі застосовується в РЕМ як додаткові джерела інформації.

Аналіз фрактографії поверхонь руйнування проводився на поверхні зламу зразків, які були зруйновані розтягом.

#### 2.4 Висновки до розділу 2

1. Описано та обґрунтовано технологію виготовлення бейнітного чавуну, а також його термообробку, яка забезпечує отримання необхідної структури. Матеріал витримується при 900 °С для аустенізації, після чого проводиться ізотермічне гартування за температур 280 °С, 300 °С, 310 °С, 340 °С, 350 °С та 400 °С протягом 2 годин у рідкому олові.

2. Обґрунтовано вибір комплексу методів дослідження, який включає вимірювання механічних параметрів методом одновісного розтягу, дослідження ударної в'язкості, вимірювання твердості, квазістатичний метод визначення демпфуючої здатності та фрактографічний аналіз поверхні зламу випробованих зразків.

3. Застосовані експериментальні методики дозволяють отримати достовірні результати стосовно рівня характеристик, що досліджуються.



### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати були отримані від матеріалу наступного хімічного складу: 3,2 %... 3,4 % C; 1,4 %... 1,6 % Si; 0,2 %... 0,3 % Mn; 0,01 %... 0,02 % Cr; 0,18 % Mo; 0,3 % Cu; 0,4 % Ni; 0,02 % P; S < 0,02 %; модифікатори: 7,5 % Mg, 35 % СК25, 17 % Al, 9 % SiBa (20 % Ba), 17,5 % Fe, 12 % модифікатор-флюс «Рефтокон» та 9 % РЗМ (ФС30РЗМ30). Велика кількість легуючих елементів забезпечила кулясту форму графіту та бейнітну структуру із залишковим аустенітом, а також задовільні характеристики лиття та прогартовуваності.

У попередніх дослідженнях [13, 32] вивчалось питання оптимальної технології виготовлення та використання матеріалу бейнітного високоміцного чавуну як матеріалу для вузлів тертя. Вивчення саме зносостійкості чавуну відбувалося на процесах, які проходили у приповерхневих шарах під дією навантаження, зокрема тертя-ковзання [33]. Матеріал у доріжках тертя проявив здатність до самозміцнення при статичному навантаженні завдяки фазовому переходу залишкового аустеніту в мартенсит. Ці результати показали, що матеріал може застосовуватися для змінних деталей сільськогосподарської техніки, яка працює при підвищених температурах (20 °С... 50 °С у літній період) та в агресивному середовищі ґрунтів. Тому метою наступних етапів досліджень було встановити, які ж процеси відбуваються в об'ємі матеріалу протягом деформації та за яким механізмом вона проходить. Це дозволить дати оцінку механічним характеристикам, які визначатимуть технологічність матеріалу та перспективи його застосування.

#### 3.1 Ударна в'язкість ADI чавуну

У реальних умовах роботи в ґрунтах деталі землеоброблюваної техніки можуть зазнавати ударів від кам'янистого ґрунту. Саме тому дослідити реакцію матеріалу на удар є дуже важливим науковим завданням. Особливості реакції

будуть залежати від вмісту перетвореного аустеніту, який буде різним за різних температур ізотермічної витримки.

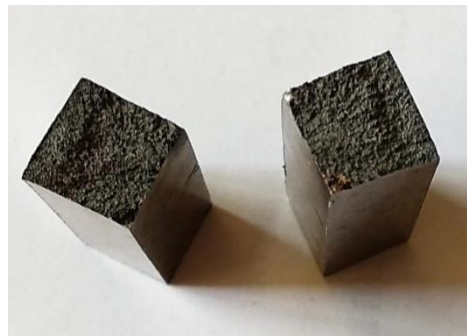
Випробувані на удар без надрізу зразки були ізотермічно витримані за температур 310 °С, 350 °С та 400 °С (рис. 3.1, а, б). Зразки зруйнувалися точно по середині з характерним для крихкого руйнування сколом (рис. 3.1, в).



а)



б)



в)

Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд досліджуваних зразків

Таким чином було проаналізовано вплив температури ізотермічного гартування на здатність матеріалу поглинати енергію механічного впливу, зокрема динамічного удару.

Ударна в'язкість зразків без термічної обробки має найменші показники – від 2 кгс·м/см<sup>2</sup> до 4 кгс·м/см<sup>2</sup>. Після гартування за температури 310 °С цей показник коливається в межах 5 кгс·м/см<sup>2</sup> ÷ 8 кгс·м/см<sup>2</sup>. Гартування за температури 350 °С не суттєво змінює, але знижує здатність матеріалу поглинати механічну енергію, і виміряна величина коефіцієнту ударної

в'язкості становить приблизно  $4,5 \text{ кгс}\cdot\text{м}/\text{см}^2 \div 5,5 \text{ кгс}\cdot\text{м}/\text{см}^2$ . Покращення показників ударної в'язкості із підвищенням температури ізотермічного гартування до  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  не спостерігається, навпаки – матеріал втрачає цю здатність порівняно із вихідним станом (рис. 3.2). Це можна пояснити утворенням у процесі термічної обробки різної кількості верхнього чи нижнього бейніту. За температур ізотермічного гартування до  $310 \text{ }^\circ\text{C}$  у структурі наявний нижній бейніт у незначній кількості [34]. Завдяки цьому зберігається висока пластичність матеріалу, що дозволяє ефективно поглинати енергію, демонструючи кращу ударну в'язкість, порівняно із вихідним станом. Підвищення температури ізотермічного гартування до  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  сприяє фазовому перетворенню, внаслідок якого формується структура верхнього бейніту, яка є більш крихкою за рахунок розташування карбідних частинок по границях бейнітних пластин, а не всередині як у нижнього бейніту. Це, що призводить до зниження ударної в'язкості. Низький рівень в'язкості матеріалів, термооброблених за температури  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  може пояснюватись іншим перебігом фазового перетворення протягом ізотермічного гартування.

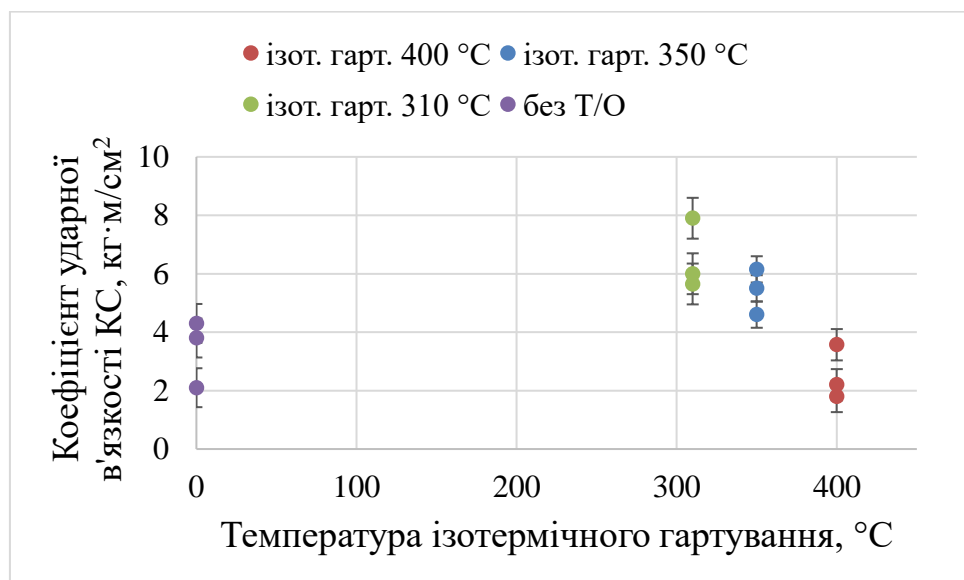


Рисунок 3.2 – Залежність впливу температури ізотермічного гартування на ударну в'язкість ADI чавуну

Можна зробити висновок, що за результатами динамічних випробувань краще показав себе матеріал, ізотермічно загартований за температури 310 °С та 350 °С. Отже, така термічна обробка може забезпечити високий рівень поглинання механічної енергії. Тобто, матеріал зможе витримувати динамічні навантаження без руйнування.

### 3.2 МікродюрOMETричні характеристики матеріалу

Вимірювання мікротвердості грає важливу роль у вивченні механічних властивостей матеріалу. У даній роботі це є необхідним, адже режим термічної обробки істотно змінює багато параметрів, які є суттєвими для матеріалу протягом роботи в умовах циклічних навантажень. Поверхня зразків після індентування має вигляд, наведений на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Поверхня зразків після вимірювання мікротвердості

На рисунку 3.4 видно тенденцію зміни мікротвердості від температури ізотермічного гартування: як і очікувалося, дана термічна обробка позитивно впливає на твердість. Однак, підвищення температури ізотермічного гартування з 310 °С до 350 °С не призводить до збільшення рівня мікротвердості: матеріал стає більш м'якішим. Найбільшу мікротвердість мали зразки ізотермічно загартовані за температури 310 °С. Такі результати підтверджують характер структурних перетворень, визначених у попередніх випробуваннях.

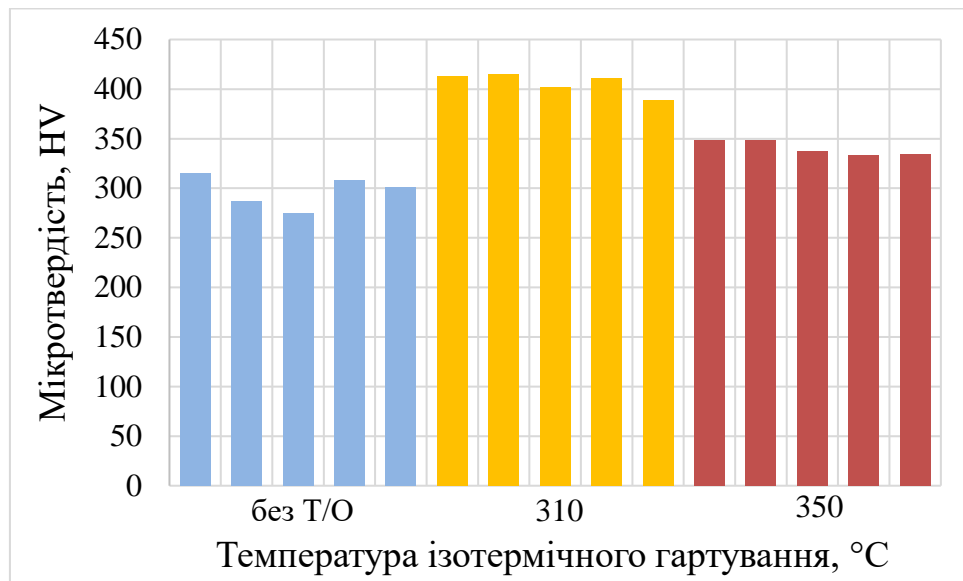


Рисунок 3.4 – Залежність мікротвердості від температури ізоітермічного гартування

Порівнюючи отримані значення мікротвердості із табличними даними для різних марок бейнітного чавуну із кулястим графітом (без додаткової термічної обробки) із табл. 5 можна стверджувати, що проведене ізоітермічне гартування значно підвищило показники мікротвердості.

### 3.3 Механічна поведінка чавуну в умовах одноісного розтягу

Для випробувань на розтяг було обрано зразки із бейнітного чавуну, які були ізоітермічно загартовані за температури 310 °С та 350 °С, так як вони мають кращі показники мікротвердості та ударної в'язкості. Границя міцності незагартованих зразків із ADI чавуну коливається в межах 810 МПа ÷ 890 МПа. Значення границі міцності для зразків термооброблених за температури 310 °С мають найвищі показники (рис. 3.5), які у 1,5 рази перевищують вихідні значення. З подальшим підвищенням температури ізоітермічного гартування матеріал втрачає міцність на 20 %, що у котрий раз підтверджує крихкість бейнітної структури, що утворюється протягом термічної обробки.

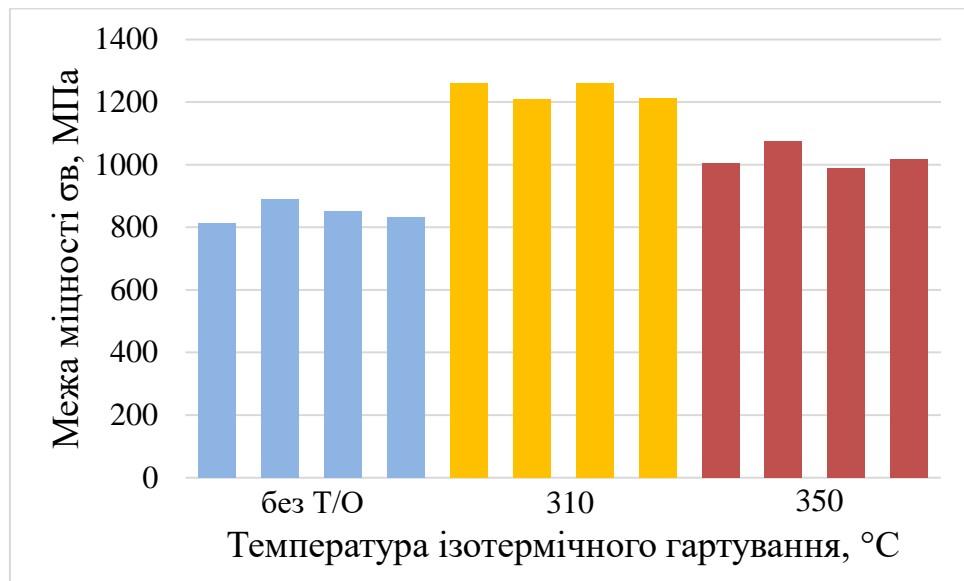


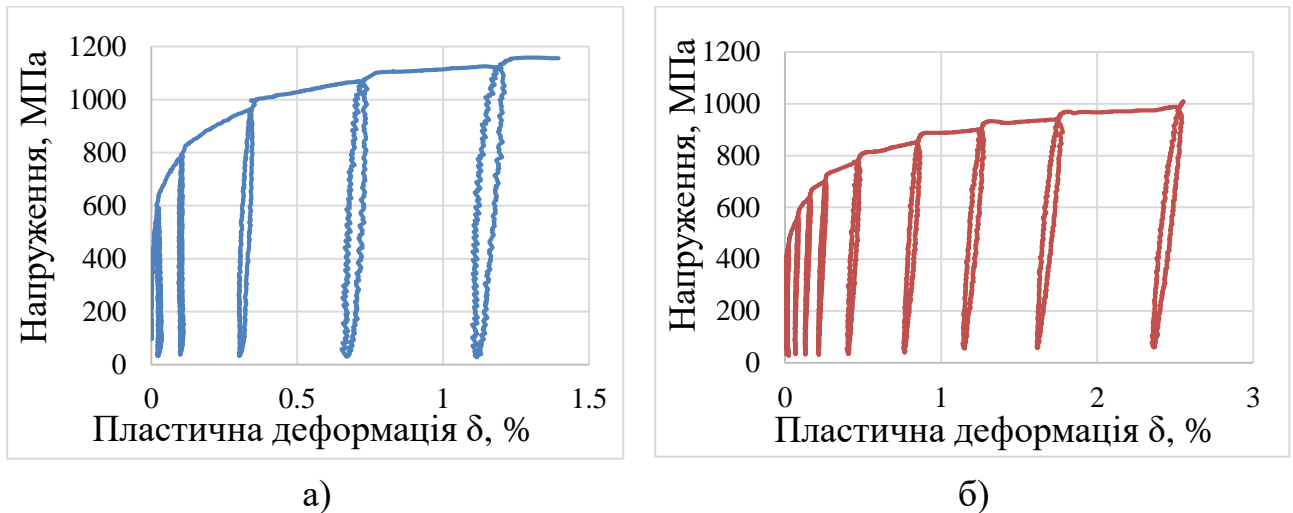
Рисунок 3.5 – Залежність межі міцності від температури ізотермічного гартування

Наступним кроком у дослідженні було перевірити поведінку матеріалу при циклічних навантаженнях після проведеної термічної обробки (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Зразок після циклічних випробувань

На рисунку 3.7 наведені діаграми в координатах «напруження – пластична деформація» циклічно навантажених зразків. Поступово навантажуючи зразок, загартований за 310 °С, а потім з тою же швидкістю розвантажуючи, спостерігається типова форма утворених деформаційних петель (рис. 3.7, а). Самі петлі зі збільшенням кількості циклів (тобто, ступенем попередньої пластичної деформації) стають ширшими, що свідчить про протікання процесів, на які витрачається велика кількість енергії.



а) 310 °С; б) 350 °С

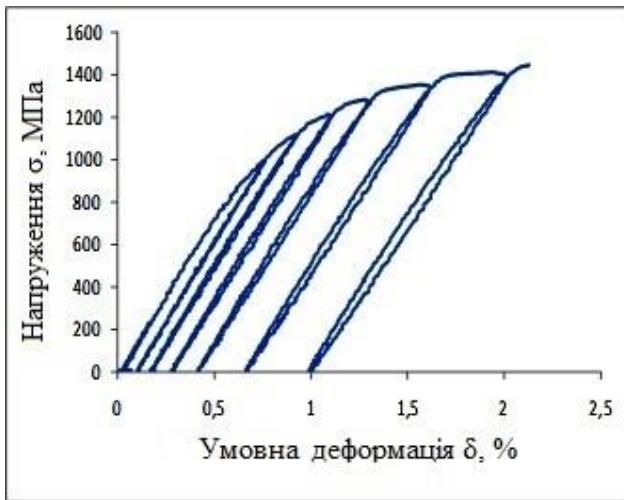
Рисунок 3.7 – Діаграми напруження-деформація з деформаційними петлями зразків після гартування

Однак, збільшивши температуру гартування до 350 °С (рис. 3.7, б) видно, що зразок витримує більшу кількість циклів навантаження до руйнування, ніж зразок із термообробкою за температури 310 °С.

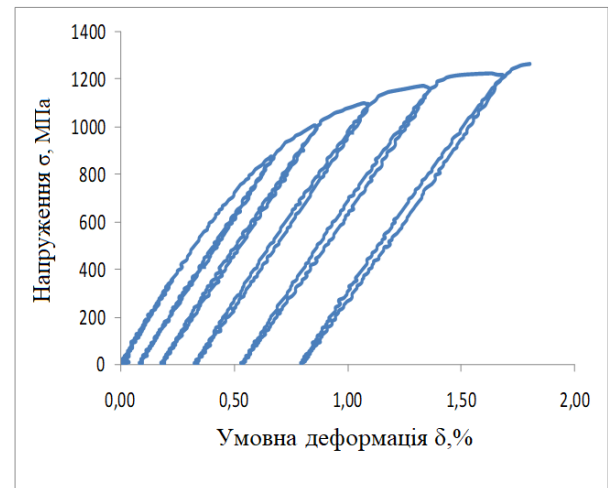
В усіх вище описаних випробуваннях було встановлено, що найкращі характеристики демонструють зразки після ізотермічного гартування в інтервалі температур від 300 °С до 350 °С. Тому було прийнято рішення детально дослідити, як поводить себе матеріал ізотермічно загартований за температур 280 °С, 300 °С та 340 °С.

На рис. 3.8 наведено деформаційні криві, отримані при циклічних навантаженнях розтягу-стиску від досліджених за обраних температур зразків.

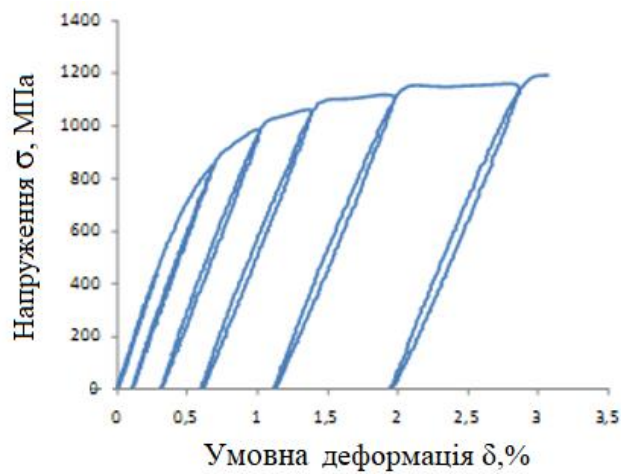
У всіх трьох досліджених випадках простежується загальна закономірність: ширина петлі збільшується зі зростанням ступеню попередньої пластичної деформації. Характер деформаційних петель схожий, що свідчить про однаковий механізм проходження деформації. Це підтверджується співпадінням накладених висхідних ділянок петель одна на одну в зразках, ізотермічно загартованих за обраних температур.



а)



б)



в)

а) 280 °С; б) 300 °С; в) 340 °С

Рисунок 3.8 – Деформаційні криві з петлями гістерезису ADI чавуну, ізотермічно загартованого за різних температур

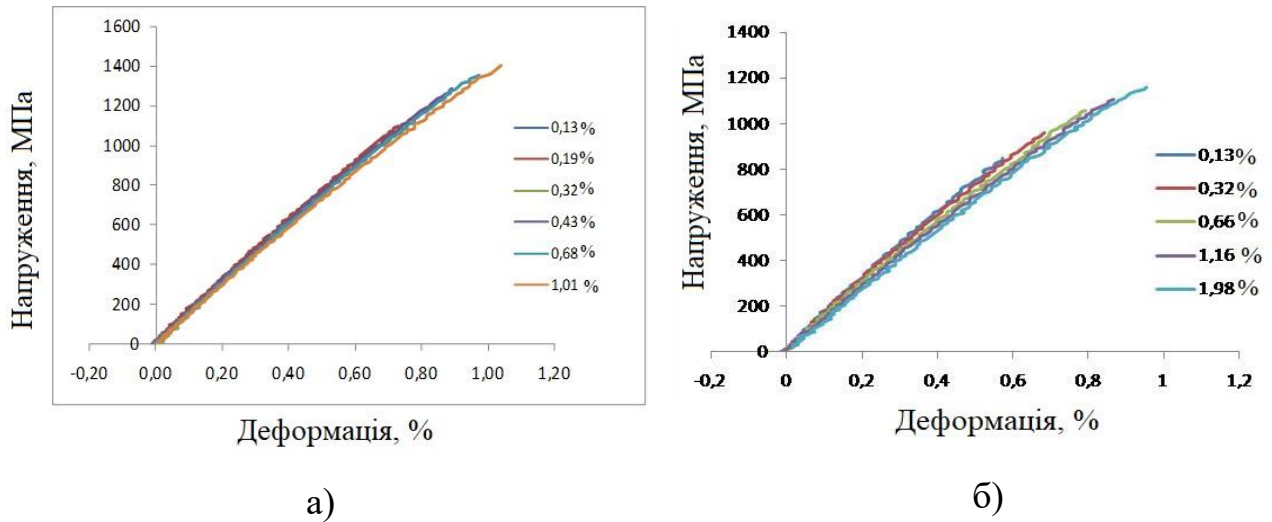
На рисунку 3.9 наведено результати накладання ділянок петель для зразків термічно оброблених за температур 280 °С та 340 °С.

Отже, можна зробити висновок, що рівень попередньої пластичної деформації не вносить зміни у механізм псевдопружної деформації.

Проаналізувавши форму ділянок деформаційних кривих між петлями на рисунках 3.7, 3.8, можна побачити, що у зоні пластичної деформації для зразків, термооброблених вище 300 °С на початку кожного нового інтервалу між петлями спостерігається виступ, схожий на «зуб плинності». Цей «зуб»



сигналізує про накопичення дефектів структури, якими можуть бути як двійники деформації, так і рухомі дислокації, як це було показано авторами в роботі [6].



а) 280 °С; б) 340 °С

Рисунок 3.9 – Виокремлені ділянки пружних петель для зразків, ізотермічно загартованих при різних температурах

Поява «зубу» є наслідком структурних перетворень при формуванні верхнього бейніту, який в істотній кількості виникає протягом ізотермічного гартування за температур 340 °С ÷ 350 °С, що відображається у більшому розмірі «зубу».

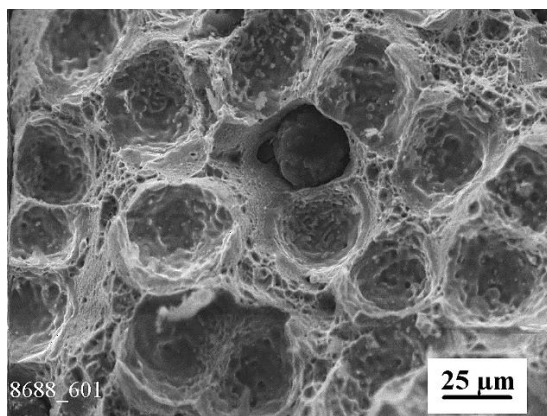
Таким чином, можна зробити висновок, що структура верхнього бейніту сприяє полегшенню перебігу деформації бейнітного чавуну за рахунок структурних дефектів у вигляді дислокацій або двійників.

### 3.4 Фрактографічний аналіз деформованих зразків ADI чавуну

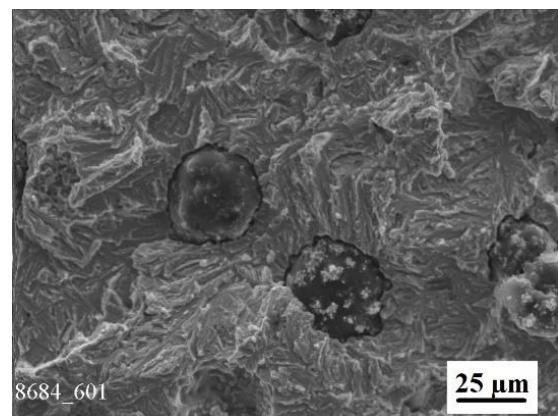
В попередніх роботах авторами [37 – 36] було доведено, що в досліджуваному високоміцному бейнітному чавуні під впливом зовнішніх стискаючих напружень реалізується TRIP-ефект (фазове перетворення під дією

пластичної деформації). Тобто, залишковий аустеніт, який не перетворився у бейніт протягом ізотермічного гартування бездифузійним шляхом під впливом зовнішніх навантажень перетворюється в мартенсит. Мартенсит є міцною, але крихкою, навіть порівняно із бейнітом, фазою. Таким чином поява на фрактографічних поверхнях ділянок фасеткового сколу може бути підтвердженням реалізації TRIP-ефекту в досліджуваному ADI чавуні.

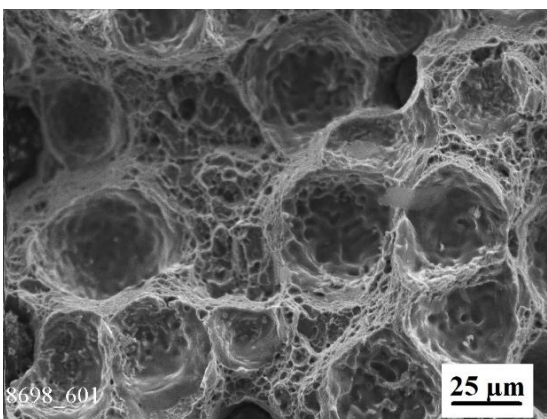
За допомогою скануючого електронного мікроскопу було здійснено фрактографічний аналіз поверхонь зламу зразків після випробувань на стиск, які були ізотермічно загартовані за температур 280 °C, 300 °C, 310 °C, 340 °C, 350 °C (див. рис. 3.10, 3.11, 3.12).



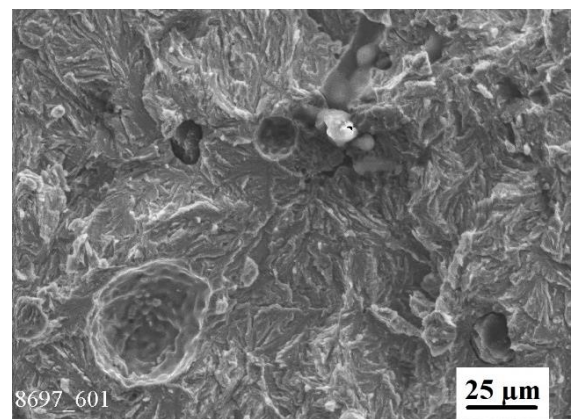
а)



б)



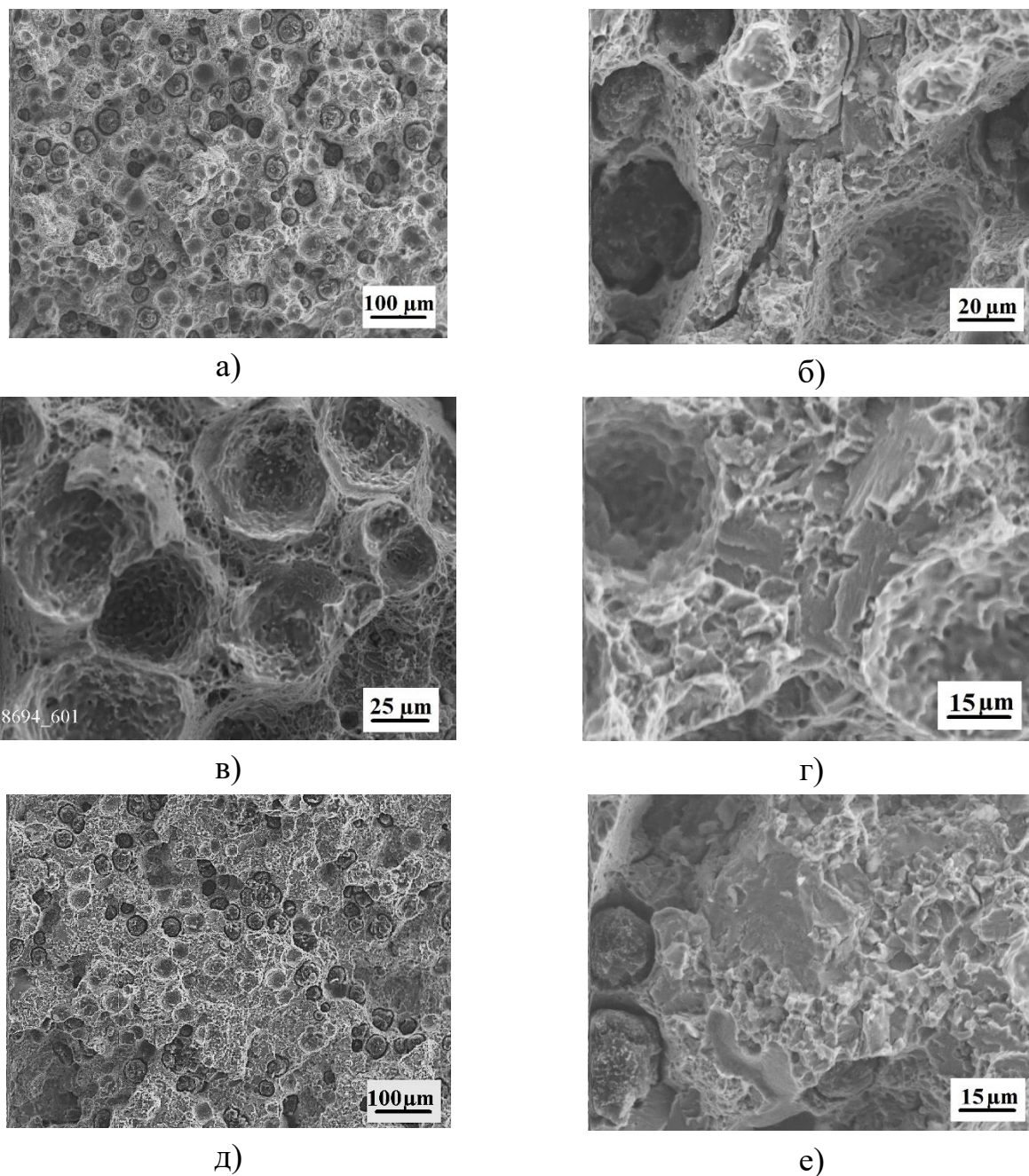
в)



г)

а), б) – 280 °C; в), г) – 300 °C

Рисунок 3.10 – Фрактографія зразків, ізотермічно загартованих за різних температур



a), б) – 310 °С; в), г) – 340 °С; д), е) – 350 °С

Рисунок 3.11 – Фрактографія зразків, ізотермічно загартованих за різних температур

На поверхні руйнування всіх зразків переважає ямковий рельєф та видно частинки кулястого графіту.

Порівнюючи фрактографію сколу зразків, термооброблених за різних температур (рис. 3.10 та 3.11), можна зробити висновок, що при вищих температурах утворюється крихка фаза в більшій кількості. Такий висновок

можна зробити за зростанням площі зайнятої крихкими фасетками сколу. Цей результат співпадає з отриманими нами в попередніх роботах даними [37 - 39] про розпад залишкового аустеніту в мартенсит, у яких методами рентгенівських досліджень було показано, що саме наявність в структурі верхнього бейніту сприяє перетворенню більшої частки залишкового аустеніту в мартенсит під дією пластичної деформації.

Такі структурні зміни пояснюються тим, що за більш високих температур дифузійна рухливість атомів заліза вище, й процес перетворення  $\gamma \rightarrow \alpha$  на перших етапах іде активніше. Тим не менш, основною рушійною силою розпаду аустеніту в мартенсит є градієнт концентрації вуглецю в середині обох фаз. Чим глибше в  $\gamma$ -фазу проростають зерна  $\alpha$ -фази, тим меншим він стає на границі розподілу обох фаз, що уповільнює процес розпаду.

### 3.5 Схильність бейнітного чавуну до демпфування та механізм його реалізації

Виявлена фрактографічним аналізом істотна доля крихкого та квазікрихкого руйнування в зламі деформованих зразків вимагає проведення досліджень для визначення рівня пластичності матеріалів. Це можна з'ясувати, аналізуючи схильність матеріалу до демпфування, яка була встановлена в підрозділі 3.3.

Демпфуючу здатність досліджували на зразках, які були ізотермічно загартовані за температур 280 °C, 300 °C та 340 °C.

Розрахунок відносної здатності деформованого матеріалу накопичувати пружну енергію здійснювався за формулою (1.1) згідно з методикою, описаною в підрозділі 2.3.4. На рисунку 3.13 продемонстровано вплив температури ізотермічного гартування на здатність ADI чавуну до демпфування, яка має змінний характер у залежності від ступеню деформації.

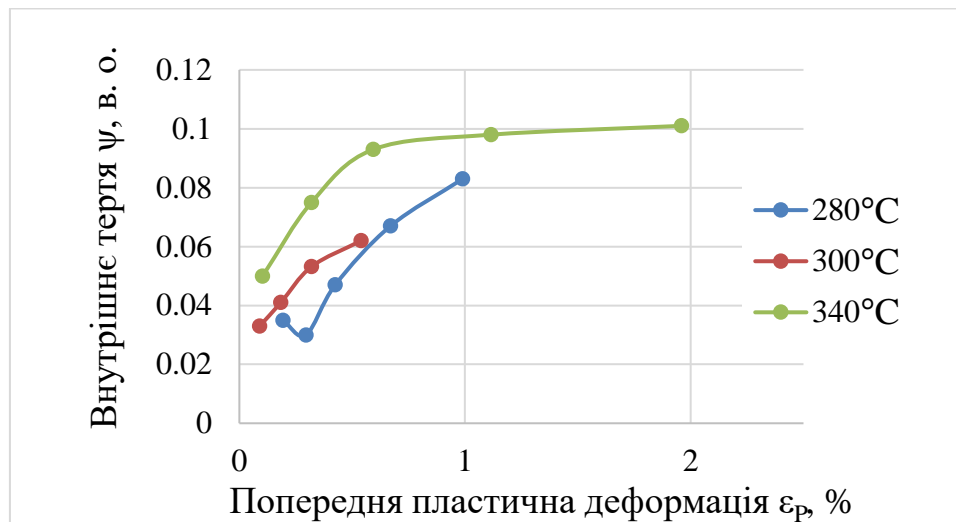


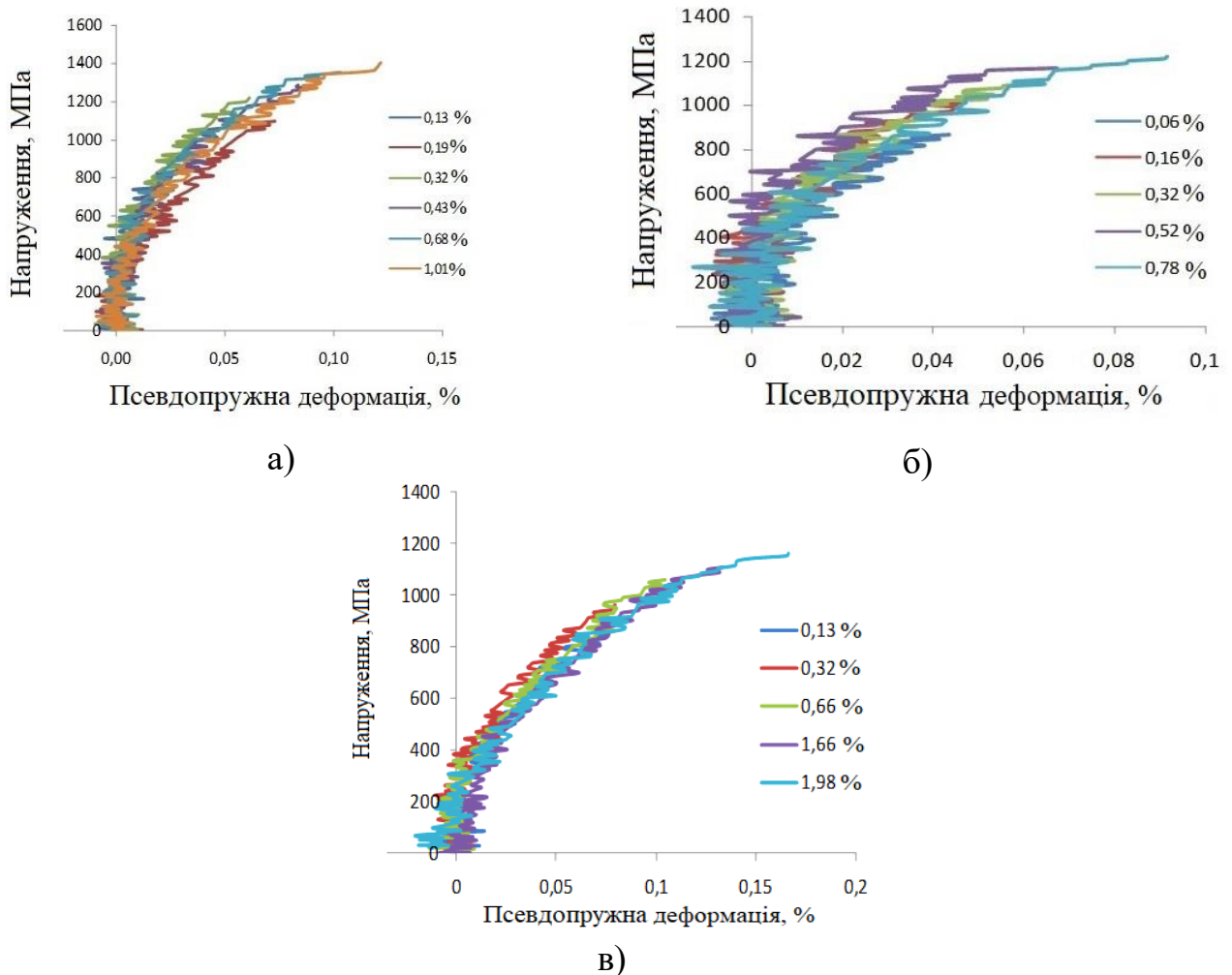
Рисунок 3.13 – Залежність демпфування від ступеню попередньої пластичної деформації, для ADI чавуну, загартованого при різних температурах

Отримані результати експерименту показують, що у всіх випадках схильність до демпфування різко збільшується зі збільшенням ступеню деформації. При цьому ізотермічне гартування за температур 280 °C та 300 °C, як зазначають автори [37], призводить до формування дрібнодисперсної структури нижнього бейніту. Саме тому схильність до демпфування цих зразків майже однакова. В той же час, ізотермічне гартування за температури 340 °C сприяє формуванню структури верхнього бейніту, який є менш дрібнодисперсним та пластинчастим, і містить більшу кількість залишкового аустеніту, що підвищує схильність до демпфування, порівняно з нижнім бейнітом. Тобто, різниця температур ізотермічного гартування всього у декілька десятків градусів грає дуже важливу роль в утворенні структури, яка визначає подальшу поведінку матеріалу при навантаженнях. Зростання схильності до демпфування може успішно конкурувати з окрихченням, яке виникає внаслідок TRIP-ефекту протягом пластичного деформування зразків.

Щоб оцінити, як саме рівень попередньої пластичної деформації впливає на пружні властивості ADI чавуну необхідно порівняти форму утворених петель. Як було показано вище, висхідні ділянки пружних петель

переміщувались до нульового значення деформації без урахування попередньої пластичної складової, щоб виявити характер зміни їх форми (рис. 3.9).

Для більш прецизійного дослідження псевдопружної складової з отриманих діаграм спочатку була виділена ділянка повної, зворотної, пружної деформації. Розраховані таким чином залежності напруження ( $\sigma$ ) від псевдопружної деформації ( $\epsilon_i$ ) для всіх досліджуваних зразків наведені на рис. 3.11 (біля кожної лінії вказано рівень попередньої пластичної деформації). Вони показали схожі результати: в усіх трьох досліджених випадках висхідна ділянка петель, які отримані після різних ступенів попередньої деформації практично співпадає.



Таке співпадіння свідчить про те, що величина попередньої пластичної деформації не впливає на характер кривих, а лише на остаточні значення напруження та величини псевдопружної деформації. Тобто деформаційні дефекти, що виникають при пластичній деформації не вносять додаткового впливу на механізм утворення псевдопружності.

Певна розмитість кривих пов'язана з наближенням деформаційних параметрів до границі розрізнення випробувальної машини (датчика переміщення).

Інша картина спостерігається, якщо порівнювати криві псевдопружності при однакових ступенях попередньої деформації в зразках, що були загартовані при різних температурах (рис. 3.15).

У цьому випадку очевидно, що характер кривих залежить від умов ізотермічного гартування. Зі зростанням температури збільшується значення деформації, що відповідає однаковим величинам прикладених напружень.

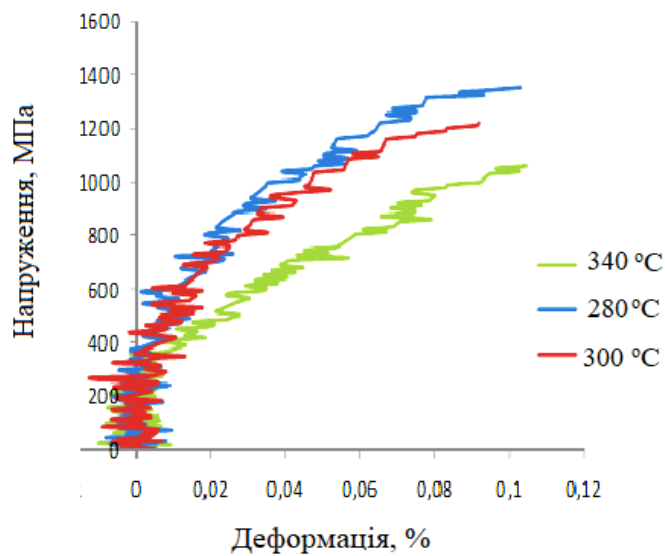


Рисунок 3.15 – Виокремлені висхідні ділянки псевдопружних петель ADI чавуну, загартованого при різних температурах

Таким чином можна зробити висновок, що зростання температури ізотермічного гартування сприяє формуванню бейнітної структури, яка з одного боку покращує умови утворення мартенситу під дією деформації, що

може призводити до окрихчення матеріалу, а з іншого – сприяє прояву демпфуючих властивостей, що запобігає передчасному крихкому руйнуванню.

Наступним етапом досліджень були спроби з'ясувати механізм реалізації демпфуючої здатності. У зразках підданих ізотермічному гартуванню за температури 280 °С, 300 °С та 340 °С в процесі деформації реалізується зсувний механізм росту мартенситної фази. У відповідності до сучасних уявлень про механізм псевдопружної поведінки матеріалів мартенситного класу [40], основною фізичною причиною, що визначає їх особливу механічну поведінку є утворення псевдопружних двійників. Їх виникнення компенсує неспівпадіння пружних полів, що виникають внаслідок різниці параметрів кристалічних ґраток аустеніту та мартенситу [41]. Підтвердження виникнення псевдопружних двійників було виконано авторами [6]. Відповідна структура зображена на рисунку 1.6. На жаль, у даному дослідженні не вдалося провести подібне електронно-мікроскопічне дослідження на зразках обраного матеріалу у зв'язку зі складнощами підготовки поверхні. Однак, отримані результати інших досліджень опосередковано підтверджують протікання аналогічного процесу і в досліджуваному ADI чавуні.

Двійникування призводить до формування додаткової кількості когерентних границь, які гальмують рух дислокацій, зміцнюючи матеріал [6, 42]. Однак, когерентність не перешкоджає наявній високій щільності дислокаційних петель забезпечувати деяку пластичність матеріалу. Саме така поведінка і спостерігається в досліджуваному матеріалі.

### 3.6 Висновки до розділу 3

1. Ізотермічне гартування досліджуваного ADI чавуну в температурному інтервалі 310 °С ÷ 350 °С призводить до формування бейнітної структури, яка сприяє збільшенню ударної в'язкості вдвічі, порівняно з вихідним станом матеріалу (до 5 кгс·м/см<sup>2</sup> ÷ 8 кгс·м/см<sup>2</sup>). Встановлений рівень відповідає показникам ударної в'язкості для високоміцних чавунів з кулястим



графітом бейнітної структури. Після ізотермічного гартування за температури 310 °С в матеріалі формується структура нижнього бейніту. Ізотермічне гартування за температури 350 °С сприяє формуванню верхнього бейніту, ударна в'язкість якого нижче на 20 % за рахунок розташування карбідних частинок по границях феритних пластин, а не всередині, як в нижньому бейніті. Підвищення температури ізотермічного гартування до 400 °С активізує процеси перетворення аустеніту в перліт, що істотно зменшує ударну в'язкість.

2. Мікротвердість досліджуваних зразків на 12 % ÷ 15 % вища за типову для високоміцних чавунів, що ще раз підтверджує правильність обраного температурного інтервалу ізотермічного гартування на рівні 310 °С ÷ 350 °С.

3. Значення границі міцності для зразків термооброблених за температури 310 °С мають найвищі показники, які у 1,5 рази перевищують вихідні значення. З подальшим підвищенням температури ізотермічного гартування матеріал втрачає міцність на 20 %, що у котрий раз підтверджує вищу крихкість структури верхнього бейніту, що утворюється протягом термічної обробки.

4. Особливості форми та розмірів псевдопружних петель досліджуваного ADI чавуну доводять відсутність залежності перебігу процесів деформаційного зміцнення від ступеню попередньої пластичної деформації. Поява «зубу» плинності на початку кожного нового циклу при випробуваннях зразків, ізотермічно загартованих починаючи з температури 340 °С є свідченням формування більш дрібнодисперсної структури верхнього бейніту, в якому для здійснення пластичної деформації необхідне формування додаткової кількості рухомих дефектів.

5. Фрактографічний аналіз зразків, ізотермічно загартованих в інтервалі температур 280 °С ÷ 350 °С та підданих після цього пластичному деформуванню виявив чітку залежність морфології структури зламу від кількості перетвореного залишкового аустеніту в мартенсит за механізмом TRIP-ефекту. Ізотермічне гартування за вищих температур (310 °С, 340 °С,

350 °C) призводить до формування верхнього бейніту, який за рахунок більшої нерівномірності концентрації вуглецю сприяє активнішому мартенситному перетворенню протягом деформування матеріалу.

б. Дослідження демпфуючих характеристик ADI чавунів виявили, що утворення протягом ізотермічного гартування за температур вище 310 °C структури верхнього бейніту сприяє прояву демпфуючої здатності в більшій мірі, ніж за умови утворення структури нижнього бейніту. Таким чином можна стверджувати, що ізотермічне гартування за температур вище 320 °C призводить до формування матеріалу, схильного до поглинання механічної енергії, яка спрямовується на утворення та роботу структурних двійників. Утворені оборотні псевдопружні двійники сприяють формуванню когерентних границь зерен, які знижують схильність матеріалу до деформаційного зміцнення, забезпечуючи достатній рівень пластичності, який разом зі збільшеною міцністю після виникнення мартенситу деформації забезпечує формування необхідного комплексу експлуатаційних характеристик досліджуваного ADI чавуну.

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Охорона праці є невід'ємною частиною організації виробництва та праці. Вона вимагає створення таких умов трудової діяльності, при яких виключається вплив на працюючий персонал небезпечних і шкідливих виробничих факторів, а також забезпечення безпеки здоров'я та працездатності людини в процесі її трудової діяльності. Основні положення про охорону праці визначені Конституцією України, Законом України «Про охорону праці» та іншими нормативно-технічними та законодавчими актами визначені основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, на належні, безпечні і здорові умови праці [43].

Метою даного розділу є аналіз шкідливих та небезпечних для організму факторів та умов, що можуть виникнути в процесі дослідження впливу умов ізотермічного гартування на псевдопружну поведінку високоміцного бейнітного чавуну, а також розробка заходів спрямованих на усунення цих факторів та забезпечення безпеки під час надзвичайних ситуацій.

### **4.1 Аналіз вимог до безпеки праці**

Забезпечення безпеки, збереження здоров'я та працездатності людини протягом усього робочого процесу є основною метою по безпеці праці на виробництві, яка досягається шляхом дотримання певного комплексу правил.

Відповідно до рекомендацій МОП, визначають такі основні фактори виробничого середовища, що чинять вплив на працездатність та здоров'я людини під час робочого процесу [44]:

1) фізичні зусилля (переміщення вантажів певної ваги в робочій зоні, утримування вантажів, тиснення на предмет праці або важелі протягом певного часу). Таке напруження поділяють на: незначне, середнє, сильне і дуже сильне;

2) нервові напруження (складність розрахунків, особливі вимоги до якості продукції, складність управління механізмом, приладдям, небезпека для життя, особлива точність виконання завдання). Є такі види напруження: незначне, середнє, підвищене;

3) робоче положення (положення тіла людини і його органів відносно засобів виробництва). Розрізняють незручне, обмежене, незручно-стиснене та дуже зручне робоче положення;

4) монотонність роботи (багаторазове повторення одноманітних та короткочасних операцій, дій тощо). Монотонність може бути: незначна, середня, підвищена;

5) температура, вологість, теплове випромінювання в робочій зоні. Стадії впливу зазначених факторів поділяються на: незначні, підвищені або знижені, середні, високі, дуже високі;

6) забруднення повітря. Ступінь забруднення повітря може бути незначний, середній, підвищений, сильний, дуже сильний;

7) виробничий шум (частота шуму в герцах, сила шуму в децибелах). Розрізняють помірний, підвищений і сильний шум;

8) вібрація, обертання, поштовхи (амплітуда на хвилину, градуси і кількість обертів або поштовхів за хвилину). Є такі рівні значень указаних факторів: підвищені, сильні, дуже сильні;

9) освітленість робочої зони. Освітленість може бути нормальна, недостатня або осліплююча.

Виконання будь-якої роботи потребує обов'язкового дотримання правил охорони праці для запобігання виробничого травматизму і професійні захворювань.

Використані матеріали та застосоване для їх дослідження обладнання можуть бути причиною виробничих травмувань та професійних захворювань, а також виникнення небезпечних ситуацій у процесі роботи. У табл. 4.1 наведено шкідливі фактори, які можуть виникнути у ході виконання магістерської дисертації.

Таблиця 4.1 – Шкідливі та небезпечні виробничі фактори, що можуть мати місце при виконанні магістерської роботи

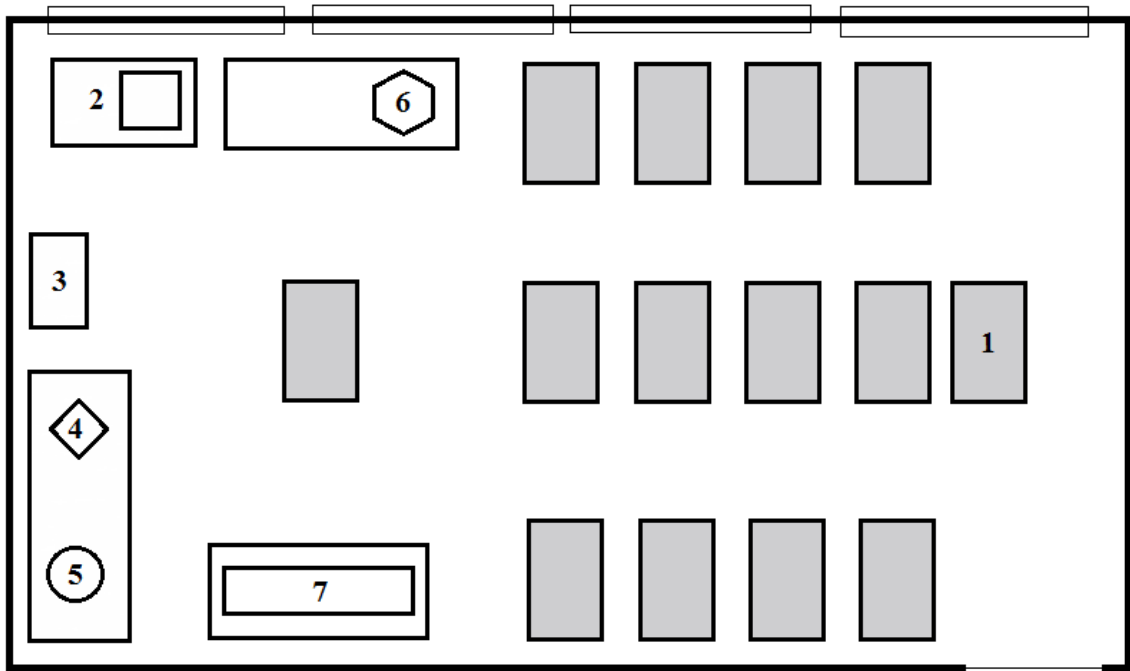
Найменування операцій	Устаткування	Вид фактору	Потенційні небезпеки
Випробовування на розтяг	Розривна машина	фізичний	Вібрації, травматизм
Робота на мікроскопі	Растровий електронний мікроскоп	фізичний	Можливе ураження струмом
Обробка експерименту	Комп'ютер ЕОМ	фізичний	Можливе ураження електричним струмом

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно раціонально використовувати робочий простір, а саме правильне розташування основного та допоміжного устаткування, виробничих меблів, та організація робочих місць. Порядок розташування і відстань визначається розмірами, технологічними умовами і вимогами техніки безпеки. У даному випадку стан робочих місць забезпечує зручні та безпечні дії з матеріалами та експлуатацію обладнання.

#### 4.2 Аналіз параметрів приміщення

Дослідження демпфуючих характеристик матеріалу проводилися в лабораторії, яка знаходиться в ІПМ ім. І. М. Францевича. Основна робота виконувалася в 511 лабораторії (9 корпус) Інженерно-фізичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського, тому саме вона була обрана для визначення основних вимог робочого приміщення.

Схематичне зображення аудиторії, а також розташування всіх елементів, представлено на рис. 4.1.



1 – робочі столи; 2 – стіл з комп’ютером; 3 – шафа; 4 – мікротвердомір ПМТ-3; 5 – металографічний мікроскоп МІМ-7; 6 – профілограф-профілометр „Калібр” К-201; 7 – дилатометр катковий

Рисунок 4.1 — Схематичне зображення 511 аудиторії 9 корпусу

Було проведено вимірювання розмірів приміщення лабораторії та вікон, які складають:

- розміри лабораторії – ширина (5 м), довжина (10,5 м), висота (3,2 м);
- розміри вікон – ширина (1,1 м), висота (1,8 м).

Проведено розрахунки площі та об’єму:

- площа лабораторії складає:  $S = a \times b = 5 \cdot 10,5 = 52,5 \text{ м}^2$ ;
- об’єм лабораторії складає:  $V = a \times b \times c = 5 \cdot 10,5 \cdot 3,2 = 168 \text{ м}^3$ ;

Згідно з ДБН В.2.2-28:2010 [45], норма площі на одну особу становить  $4,5 \text{ м}^2$ , а норма об’єму приміщення на одну особу –  $15 \text{ м}^3$ .

Тобто, 511 лабораторія корпусу 9, згідно з ДБН В.2.2-28:2010 [45], відповідає нормам.

Суттєвий вплив на стан організму працівника має мікроклімат у робочих приміщеннях, під якими розуміють клімат внутрішнього середовища цих приміщень, що визначається діючою на організм людини сукупністю температури, вологості, руху повітря та теплового випромінювання нагрітих поверхонь наведений у таблиці 4.2 [46].

Таблиця 4.2 – Параметри мікроклімату

Категорія робіт	Параметр мікро-клімату	Період року	Нормовані значення мікроклімату ДСН 3.3.6.042-99 [46]		Данні вимірювань	Висновки
			Оптимальні	Допустимі		
Середньої важкості Па	Темп-ра, °С	Холодний	18 – 20	17 – 23	14	не задовольняє
		Теплий	21 – 23	18 – 27	24	оптимальні
	Відносна вологість повітря, %	Холодний	40 – 60	75	70	допустимі
		Теплий	40 – 60	65	54	оптимальні
	Швидкість руху повітря, м/с	Холодний	0,2	Не більше ніж 0,3	0,2	оптимальні
		Теплий	0,3	0,2 – 0,4	0,3	допустимі

Виконувані роботи за важкістю відносяться до категорії середньої важкості Па, так як включає в себе ходіння, переміщення дрібних (до 1 кг) предметів у положенні сидячи або стоячи і які потребують незначного фізичного навантаження. Енерговитрати організму становлять 151 ккал/год – 200 ккал/год.

Значення показників температури, відносної вологості та швидкості руху повітря для категорії робіт середньої важкості Па у лабораторії 511-9 не

повністю відповідають допустимим вимогам встановлених для постійного робочого місця в холодний період року та є несприятливими [46].

#### 4.3 Аналіз освітленості приміщення

Залежно від джерел світла освітлення може бути природним, що створюється прямими сонячними променями та розсіяним світлом небосхилу; штучним, що створюється електричними джерелами світла, та суміщеним, при якому недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним [47].

Природне освітлення стимулює біохімічні процеси в організмі, поліпшує обмін речовин, загартовує організм, йому властива протибактерицидна дія тощо. У зв'язку з цим при недостатньому природному освітленні в умовах виробництва санітарно-гігієнічні нормативи вимагають у системі штучного освітлення застосовувати джерела штучного світла з підвищеною складовою ультрафіолетового випромінювання – еритемні джерела світла.

Основним нормативним документом, відповідно до якого здійснюється нормування освітлення в нашій країні є ДБН В.2.5-28-2006 [48].

Освітлення буває трьох видів: природне, штучне і суміщене [48]. Природне у свою чергу поділяється на бічне, верхнє та комбіноване. Штучне – загальне і місцеве.

У лабораторії 511 використовується система сумісного освітлення – освітлення, при якому в світлий час доби використовується природне та штучне освітлення. При цьому, недостатнє, за умовами зорової роботи, природне освітлення доповнюється штучним (розрядне джерело світла). Природне освітлення в лабораторії – бокове, тобто здійснюється через бокові світлові прорізи у зовнішніх стінах із північної сторони.

У світлий час доби (вдень) використовується, в основному, природне освітлення. Воно забезпечує достатню освітленість та сприятливо впливає на



зір. Природне освітлення задовольняє встановлені норми, що дозволяє в денний час економити електроенергію. Світильники штучного освітлення розміщені у верхній зоні приміщення рівномірно.

#### 4.4 Вимоги до організації робочого місця

Вимоги до виробничих приміщень, організації і обладнання робочих місць наведені у НПАОП 0.00-1.28-10 [49]. Конструкція робочого місця користувача комп'ютера, а також іншого настільного устаткування (у даній роботі – це мікроскоп, мікротвердомір) повинна забезпечувати підтримання оптимальної робочого положення з такими ергономічними характеристиками [49]:

- зап'ястя зігнуті під кутом не більше  $15^{\circ}$  –  $20^{\circ}$  відносно вертикальної площини;
- лікті – під кутом  $70^{\circ}$  –  $90^{\circ}$  до вертикальної площини;
- передпліччя – вертикально;
- стегна – в горизонтальній площині; ступні ніг – на підлозі або на підставці для ніг.

Для робочого положення «сидячи» висота робочої поверхні столу має задовольняти значення від 680 мм до 800 мм, а ширина – забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля. Рекомендовані розміри столу: висота — 725 мм, ширина — 600 мм – 1400 мм, довжина — 800 мм – 1000 мм. Робочий стіл для роботи з комп'ютером повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм, на рівні витягнутої ноги – не менше 650 мм [49]. Також необхідна наявність регулювання параметрів крісла.

#### 4.4 Електробезпека

Виробничі приміщення з точки зору ураження електричним струмом належать до категорії особливо шкідливих. Експлуатація зовнішніх електроустановок прирівнюється до умов експлуатації в особливо небезпечних приміщеннях [47].

Для захисту від ураження струмом в аварійному режимі застосовують: заземлення, вимикання, подвійну ізоляцію. Заземлення застосовують завжди при живленні від мереж з ізолюваною нейтраллю та за наявності мережі з глухозаземленою нейтраллю при напрузі понад 1000 В.

Захисне вимикання — високонадійна швидкодіюча система захисту, яка застосовується в пересувних електроустановках, які використовують як генератор з ізолюваною нейтраллю, а також в інших випадках, коли умови експлуатації потребують високого рівня безпеки [47].

Електротехнічні вироби з точки зору безпеки повинні відповідати вимогам ПУЕ-2017 [50].

В аудиторії 511 розміщене такі електричні прилади:

- профілограф-профілометр „Калібр” К-201;
- металографічний мікроскоп МІМ-7;
- обчислювальна техніка (ПК);
- мікротвердомір ПМТ-3.

Живлення всього обладнання в лабораторії здійснюється від мережі з напругою 220 В. Мікроскоп має підсилену ізоляцію, профілометр та мікротвердомір має робочу ізоляцію. Аудиторія 511 відноситься до категорії приміщень підвищеної небезпеки отримання електротравм.

Чинники, що впливають на тяжкість ураження людини електричним струмом, діляться на три групи: електричного характеру, неелектричного характеру і чинники виробничого середовища.

Можливими випадками ураження електричним струмом у даній лабораторії є ураження при пошкодженні ізоляції устаткування та електричного обладнання, або при пошкодженні розетки та підвищеній вологості [50].

Для захисту від ураження струмом в аварійному режимі застосовують: заземлення, вимикання, подвійну ізоляцію [47]. Заземлення застосовують завжди при живленні від мереж з ізолюваною нейтраллю та за наявності мережі з глухозаземленою нейтраллю при напрузі понад 1000 В.

Захисне вимикання – високонадійна швидкодіюча система захисту, яка застосовується в пересувних електроустановках, які використовують як генератор з ізолюваною нейтраллю, а також в інших випадках, коли умови експлуатації потребують високого рівня безпеки [47].

#### 4.5 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

До видів небезпеки, що можуть статися на виробництві, належать: пожежа; вибух (усередині обладнання, будівлях або навколишньому середовищі); розрив або зруйнування обладнання; викид шкідливих речовин; сполучення перелічених видів небезпеки [51, 52]. З метою запобігання виникненню та ліквідації надзвичайних (аварійних) ситуацій на підприємстві має бути план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій у відповідності до положення [51]. Під час аналізу небезпеки підприємства (об'єкта) потрібно визначити всі можливі аварійні ситуації і аварії, в тому числі й малоймовірні, з катастрофічними наслідками, які можуть виникати на підприємстві, розглянути сценарії їхнього розвитку і оцінити наслідки. Виявлення можливостей і умов виникнення аварій має виконуватись на основі аналізу особливостей роботи як окремого обладнання (апаратів, машин тощо), так і їх групи (технологічних блоків), а також з урахуванням небезпечних властивостей речовин і матеріалів (вибухопожежонебезпечних та шкідливих), що використовуються у виробництві. При цьому слід враховувати параметри стану речовин (температура, тиск, агрегатний стан тощо) і стан обладнання, які

відповідають як нормальному технологічному режиму, так і режимам, які можливі при настанні й розвитку аварії [47].

#### 4.5.1 Пожежна безпека

Важливе значення для визначення рівня пожежної безпеки і вибору засобів та заходів профілактики і гасіння пожежі мають пожежовибухонебезпечні властивості речовин і матеріалів.

Категорія пожежної небезпеки приміщення — це класифікаційна характеристика пожежної небезпеки об'єкта, що визначається кількістю і пожежонебезпечними властивостями речовин і матеріалів, які знаходяться в них з урахуванням особливостей технологічних процесів, розміщених в них виробництв.

Відповідно до НАПБ Б.03.002-2007 [53] приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою відноситься до категорії Д (приміщення, в яких знаходяться негорючі речовини та матеріали в холодному стані).

Можливими причинами виникнення пожеж у приміщенні лабораторії можуть бути: коротке замикання в електричних ланцюгах, порушення правил пожежної безпеки при використанні побутових електронагрівальних приладів. Для споруди корпусу передбачені організаційні (розроблено інструкції про міри пожежної безпеки, вивішені на поверхах плани евакуації, створено пожежно-технічну комісію) та режимні (обмеження числа осіб, що здійснюють експлуатацію устаткування, виділено визначені місця для паління) заходи щодо забезпечення пожежної безпеки [54].

План евакуації в разі виникнення пожежі в лабораторії 511 наведено на рис. 4.2.

Із засобів пожежогасіння в лабораторії наявний вогнегасник ОУБ-2 (вуглекислотноброметилові). Також приміщення оснащено засобами виявлення та оповіщення про пожежу — автоматичні датчики-сигналізатори типу ДТП.

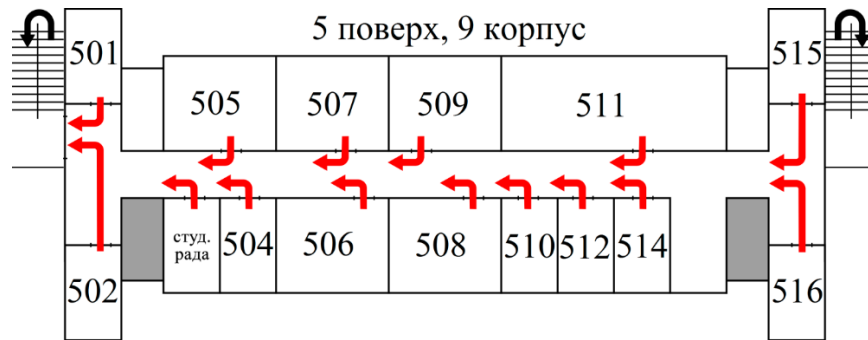


Рисунок 4.2 – План евакуації

Основними заходами протипожежної безпеки є регулярна перевірка працездатності засобів гасіння пожежі та систем пожежної сигналізації, перевірка справності електричної проводки [54].

#### 4.5.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пробою електричної напруги на корпус електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це майстра або начальника дільниці.

У випадку потрапляння кого-небудь під напругу, необхідно відключити електродуговий агрегат від мережі, покласти потерпілого на дерев'яний настил, підклавши під голову ватник, викликати лікаря за телефоном 103 і, якщо це необхідно, зробити постраждалому штучне дихання.

У випадку загорання електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

Кожен робітник і службовець, що виявив пожежу або загорання, зобов'язаний [47]:

- негайно сповістити про це в заводську пожежну охорону за номером телефону 101;
- приступити до гасіння вогню пожежі наявними в цеху (на дільниці) засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран тощо);
- викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника цеху, дільниці).

У випадку одержання травми необхідно довести до відома про це майстра, начальника дільниці та звернутися в медпункт.

Можливість виникнення надзвичайних ситуацій в приміщенні лабораторії можлива, проте її не можна віднести до масштабних НС, а лише НС об'єктового рівня.

У будівлі начального корпусу ІФФ можуть мати місце такі фактори виникнення надзвичайної ситуації як стихійні лиха (землетруси, зсуви, урагани). Будівлі не загрожує дія землетрусів, оскільки Київська область не знаходиться в сейсмічно небезпечній зоні. Достатньо стійкий корпус і до дії зсувів. Територія будівлі знаходиться на рівній поверхні і ймовірність виникнення зсувів близька до нуля.

Однак існує ймовірність того, що будівля навчального корпусу ІФФ може піддаватися дії ураганного вітру, хоча на даній місцевості ніколи не було зареєстровано вітру силою 12 балів по шкалі Бофорта. Сучасні методи прогнозу погоди дозволяють за декілька годин і навіть діб попередити населення про насування такого стихійного лиха.

Для захисту лабораторій ІФФ від виробничих аварій і катастроф, а також їх попередження, здійснюється комплекс організаційних, інженерно-технічних заходів, які визначають вимоги охорони праці і техніки безпеки, протипожежної безпеки, а також вимог інструкції по експлуатації обладнання, електричних установок, посудин під тиском [55].

Для захисту корпусу від пожеж, що викликані стихійними лихами (блискавки, замикання електропроводки внаслідок пошкодження магістралей і т.п.) використовуються громовідводи, автоматичні системи відключення, системи автоматичного пожежогасіння, а також первинні засоби пожежогасіння [56].

#### 4.6 Висновки до розділу 4

1. Проведений аналіз електро- та пожежобезпеки передбачає умови при яких може виникнути відповідна небезпека. Запропоновано заходи для уникнення травмування в процесі дослідження бейнітного чавуну на електричному устаткуванні (профілограф-профілометр, мікроскоп, мікротвердомір).

2. Аналіз умов праці в лабораторному приміщенні засвідчив, що мікроклімат, організація робочого місця та освітлення майже відповідають вимогам санітарних норм із мінімальним відхиленням від них.

## 5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### 5.1 Опис ідеї проекту

Ідея проекту спрямована на розробку технології термічної обробки для ADI чавунів з метою забезпечення високих показників витривалості та міцності виробів, які працюють при високих циклічних навантаженнях, особливо – для деталей машин землооброблюючої техніки (табл. 5.1, 5.2).

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту – розробка технології термічної обробки для ADI чавунів

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Розробка технології процесу термічної обробки для ADI чавунів для забезпечення подальших високих показників міцності	Матеріали для деталей машин землооброблюваної техніки	Отримання економічного матеріалу, який здатен витримувати значні циклічні навантаження без руйнування, що веде за собою довговічність конструкції
	Сучасні конструкційні матеріали	

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту – розробка технології процесу термічної обробки для ADI чавунів для забезпечення подальших високих показників міцності

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні конкуренти			
		Наш проект	Конкурент 1 ”LEMKEN ”	Конкурент 2 “KUHN”	Конкурент 3 “Велес-Агро”
1	Собівартість	нижча	вища	вища	стандартна
		S	W	W	S



## Продовження таблиці 5.2

	Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні конкуренти			
		Наш проект	Конкурент 1 "LEMKEN"	Конкурент 2 "KUHN"	Конкурент 3 "Велес-Агро"
2	Життєвий цикл	більший	стандартний	більший	стандартний
		S	N	S	N
3	Зносостійкість	висока	висока	висока	висока
		S	S	S	S
4	Міцність	Стандартна	Стандартна	Стандартна	Стандартна
		N	N	N	N

\* W (слабка сторона), N (нейтральна сторона), S (сильна сторона)

Потенціал для даного стартап-проекту має високоміцний бейнітний чавун із кулястою формою графіту (так званий сплав ADI чавуну), який запропонований для використання як матеріал для швидкозношуваних частин сільськогосподарської техніки (рис. 5.1).

Дослідження структури та властивостей даного матеріалу ще триває, тому оцінку ринкової спроможності можна дати лише в обмеженому вигляді.



Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд лап-плоскорізів із ADI чавуну для сільськогосподарського призначення [13]

У таблиці 5.3 представлені технології, які були використані для виготовлення та термічної обробки експериментальних зразків.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту – розробка технології процесу термічної обробки для ADI чавунів для забезпечення подальших високих показників міцності

Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Аустенізація до температури 900 °С	Технологія існує	Доступна
Ізотермічне гартування за температури 340 °С у рідкому олові	Технологія існує	Доступна
Охолодження у воду	Технологія існує	Доступна

Даний проект в майбутньому є технологічно здійсненним, адже об'єкт даного дослідження (ADI чавун) є перспективним матеріалом для використання не тільки у галузі виробництва сільськогосподарської продукції, а також як матеріал для роботи при високих навантаженнях. ADI чавун може прийти на заміну широкого класу конструкційних сталей, як економічно вигідніший матеріал.

Нині ADI чавуни отримують широкий розвиток у таких розвинених країнах як США, Німеччині, Японії, Франції, Китаї та ін. Перші повідомлення про цей матеріал з'явилися ще у другій половині XX-го століття [1]. Зараз цей високоміцний бейнітний чавун внесений до нормалей багатьох країн та увійшов до загальноєвропейських стандартів. У 1998 р. у США було виготовлено понад 80 тис. т відливок з ADI чавуну. Вони знайшли своє застосування в автомобілебудуванні, гірничодобувній промисловості,

залізничному транспорті, загальній індустрії, та при виробництві сільгосптехніки.

Сільськогосподарські угіддя України займають 42 млн. га, або 70 % загального фонду країни. З них 78,9 % займають орні землі та багаторічні насадження [57]. Для оранки щорік потрібно до 1 млн. шт лемешів, тобто щорік втрачається через відсутність утилізації більше 4,5 тис. т лемішної сталі, якої не вистачає для виробництва вказаної продукції. При виробництві лемешів до 40 % лемішної сталі потрапляє до відходів. Для збільшення зносостійкості таких деталей на ріжучу кромку наплавляють 40 % від лемешів. Середнє напрацювання з наплавленням додаткового матеріалу на одиницю складає 35 га ÷ 40 га, а без наплавлення – менше 20 га.

Якість продукції закордонних виробників має кращі показники – без носової насадки лемеші витримують до 100 га оранки. В Україні виробництво лемешів із кожним роком знижується, а постачання даної продукції із-за кордону зростає (по даним УКРЦІТ в 2006 р. закуплено всього 3000 шт. лемешів вітчизняного виробництва) [1]. Продукція українських виробників має нижчу якість. Лемеша без наплавлення ріжучої кромки витримують від 10 га до 15 га напрацювання, а з наплавленням – від 25 га до 35 га. При цьому вартість в цінах 2012 р. лемеша з наплавленням складала 130 грн – 140 грн.

Обробка ґрунту є найбільш енергоємнішим процесом сільськогосподарського сектору. Швидкий знос деталей, які працюють в ґрунтах, призводить до значного зниження експлуатаційно-технологічних показників агрегатів для оранки. Тому ADI чавун та технологія покращення його механічних властивостей є неабияк актуальною.

У табл. 5.4 визначено потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформований орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи. Проведена оцінка ринку, наведена в таблиці 5.4, дозволяє зробити висновок, що входження на ринок з даним стартап-проектом цілком можливе. У табл. 5.5 проведено аналіз факторів, які можуть вплинути на реалізацію проекту.

Таблиця 5.4 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту – розробка технології процесу термічної обробки для ADI чавунів для забезпечення подальших високих показників міцності

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Висока міцність матеріалу для роботи при високих навантаженнях	- компанії, які виготовляють деталі сільськогосподарської техніки - фермерства зі своїми посівними угіддями	стандарти, технічні регламенти, специфікації, умови експлуатації.	висока зносостійкість, низька собівартість, більший ресурс роботи деталей
2.	Висока зносостійкість деталей сіл-кої техніки			

Таблиця 5.5 – Фактори загроз стартап-проекту – розробка технології процесу термічної обробки для ADI чавунів для забезпечення подальших високих показників міцності

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Нестабільність політичної та економічної ситуації	Зменшення інвестування та попиту	Приймання участі у програмах, в тому числі міжнародних, для залучення додаткових інвестицій
	Зменшення кількості енергетичних та матеріально-технічних ресурсів, ріст цін на вихідні матеріали	Перехід на інші види джерел енергії, залучення додаткових інвестицій

Дослідження властивостей та більших можливостей застосування ADI чавунів досі триває, тому повністю оцінити ринкову спроможність та створити маркетингову модель товару неможливо. В дисертаційній роботі були досліджені фундаментальні явища, а саме: вплив вихідної структури (сплав та легуючі компоненти) та режиму термічної обробки (аустенізація до 900 °C протягом 30 хв та ізотермічне гартування за температур 310 °C, 340 °C та 350 °C протягом 2 год в рідкому олові) на механічні та технологічні характеристики, а також процеси, які відбуваються в структурі при навантаженні. Вивчення ADI чавунів і досі триває, тому цей матеріал є неабияким перспективним.

## 5.2 Висновки до розділу 5

Була проведена оцінка ринкових можливостей старап-проекту «розробка технології процесу термічної обробки для ADI чавунів для забезпечення подальших високих показників міцності». Впровадження проекту є перспективним, широкий ринок пропонованих матеріалів для деталей сільськогосподарської техніки, оскільки воно пов'язане з великою кількістю оброблюваних площ на території України. Проект потребує подальших досліджень для проведення повної оцінки його ринкових спроможностей.

## ВИСНОВКИ

1. ADI чавун є новим перспективним класом матеріалів з унікальним комплексом механічних та технологічних характеристик. Проте, чавуни є досить крихкими, що не дозволяє повною мірою використовувати їх при різкій зміні параметрів навантаження. З'ясування фізичних основ структурних перетворень, які відбуваються в матеріалі під час термічної обробки та експлуатації дозволять цілеспрямовано змінювати властивості ADI чавунів для створення виробів з заданим рівнем експлуатаційних характеристик.

2. Підібраний комплекс методів дослідження забезпечить повноцінне визначення рівня механічних характеристик та експлуатаційних параметрів матеріалу та достовірність отриманих результатів експериментів.

3. Рівні встановлених механічних характеристик досліджуваних ADI чавунів знаходяться у чіткій відповідності до типу бейнітної структури, що формується під час ізотермічного гартування. Протягом витримки за температур до 320 °C у матеріалі формується певна кількість нижнього бейніту, який має в середньому на 10 % – 20 % вищі значення ударної в'язкості, мікротвердості та границі міцності, порівняно з верхнім бейнітом, який утворюється протягом ізотермічного гартування за температур 340 °C – 350 °C. Однак, структура нижнього бейніту є вигіднішою для матеріалу, який працює при циклічних навантаженнях, адже виникаючі псевдопружні двійники сприяють полегшенню перебігу пластичної деформації, тим самим надаючи матеріалу здатність поглинати механічну енергію без руйнування.

4. Особливості форми та розмірів псевдопружних петель досліджуваного ADI чавуну доводять відсутність залежності перебігу процесів деформаційного зміцнення від ступеню попередньої пластичної деформації. Поява «зубу» плинності на початку кожного нового циклу при випробуваннях зразків, ізотермічно загартованих починаючи з температури 340 °C є свідченням формування більш дрібнодисперсної структури верхнього бейніту,

в якому для здійснення пластичної деформації необхідне формування додаткової кількості рухомих дефектів.

5. Фрактографічний аналіз зразків, ізотермічно загартованих в інтервалі температур  $280\text{ }^{\circ}\text{C} \div 350\text{ }^{\circ}\text{C}$  та підданих після цього пластичному деформуванню виявив чітку залежність морфології структури зламу від кількості перетвореного залишкового аустеніту в мартенсит за механізмом TRIP-ефекту. Ізотермічне гартування за вищих температур ( $310\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $340\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) призводить до формування верхнього бейніту, який за рахунок більшої нерівномірності концентрації вуглецю сприяє активнішому мартенситному перетворенню протягом деформування матеріалу.

6. Дослідження демпфуючих характеристик ADI чавунів виявили, що утворення протягом ізотермічного гартування за температур вище  $310\text{ }^{\circ}\text{C}$  структури верхнього бейніту сприяє прояву демпфуючої здатності в більшій мірі, ніж за умови утворення структури нижнього бейніту. Таким чином можна стверджувати, що ізотермічне гартування за температур вище  $320\text{ }^{\circ}\text{C}$  призводить до формування матеріалу, схильного до поглинання механічної енергії, яка спрямовується на утворення та роботу структурних двійників. Утворені оборотні псевдопружні двійники сприяють формуванню когерентних границь зерен, які знижують схильність матеріалу до деформаційного зміцнення, забезпечуючи достатній рівень пластичності, який разом зі збільшеною міцністю після виникнення мартенситу деформації забезпечує формування необхідного комплексу експлуатаційних характеристик досліджуваного ADI чавуну.

7. Встановлено, що мікроклімат, організація робочого місця та освітлення майже відповідають вимогам санітарних норм із мінімальним відхиленням від них.

8. Показана економічна доцільність впровадження стартап-проекту на основі матеріалів, досліджених в даній роботі.

## CONCLUSIONS

1. ADI cast iron is a new promising class of materials with unique mechanical and technological characteristics. However, cast iron is rather fragile, which prevents it from fully application during a rapid change of load parameters. Definition of the physical foundations for structural transformations, that occurred in the material during the heat treatment and operation, will allow to change the properties of the ADI material purposefully to create products with a given level of performance.

2. A selected set of research methods will provide a complete definition of the mechanical characteristics' level and operational parameters of the material and the experiments' results reliability.

3. The levels of established mechanical characteristics of the studied ADI cast iron are in strict conformity with the type of bainite structure formed during isothermal quenching. During exposure to temperatures up to 320 ° C, the material forms a certain amount of lower bainite. Due to such structure, the material has an average of 10% – 20% higher values of impact strength, microhardness and strength, compared to the upper bainite formed during isothermal hardening at temperatures of 340 ° C ÷ 350 ° C. However, the structure of lower bainite is more advantageous for a material that works under cyclic loading, since the emerging pseudo-elastic twins help to alleviate the course of plastic deformation, thus giving the material the ability to absorb mechanical energy without destroying it.

4. The peculiarities of the shape and size of the pseudo-elastic loops from the investigated ADI cast iron prove the lack of dependence of the deformation strengthening processes course on the degree of the previous plastic deformation. The appearance of the "tooth" of fluidity at the beginning of each new cycle in the tests of samples that is thermally hardened starting at a temperature of 340 ° C is an evidence of the finer dispersed structure formation of the upper bainite. Plastic deformation in such a structure occurs due to the additional number of structural defects formation.



5. The fractional analysis of samples isothermally hardened in the range of temperatures  $280^{\circ}\text{C} \div 350^{\circ}\text{C}$  and subjected to plastic deformation revealed a clear dependence of the morphology of the fracture structure on the amount of converted residual austenite into martensite by the mechanism of the TRIP-effect. Isothermal quenching at higher temperatures ( $310^{\circ}\text{C}$ ,  $340^{\circ}\text{C}$ ,  $350^{\circ}\text{C}$ ) leads to the formation of the upper bainite, which, due to greater uneven carbon concentration, contributes to a more active martensitic transformation during the deformation of the material.

6. Investigation of the damping characteristics of ADI cast iron has shown that formation of the upper bainite structure during isothermal quenching at temperatures above  $310^{\circ}\text{C}$  contributes to the appearance of damping ability to a greater extent than with the formation of the structure of the lower bainite. Thus, it can be argued that isothermal quenching at temperatures above  $320^{\circ}\text{C}$  leads to the formation of a material prone to mechanical energy absorption, which is aimed to the formation and operation of structural twins. The generated reversible pseudo-elastic twins contribute to the formation of coherent boundaries of grains, which reduce the propensity of the material to hardening. It provides a sufficient level of plasticity, which, together with increased strength after the appearance of martensite deformation, ensures the formation of the required complex of performance characteristics of the investigated ADI cast iron.

7. It has been established that the microclimate, the organization of the workplace and lighting almost meet the requirements of sanitary norms with minimal deviation from them.

8. The economic feasibility of implementing a start-up project is shown based on the materials studied in this paper.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Волощенко С. М. Создание научных принципов структурообразования в чугунах для оптимизации триботехнических : дис. докт. техн. наук : Материаловедение 05.16.02 / С. М. Волощенко – Нац. академия наук Украины, Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича, Киев, 2016. – 212 с.
2. Класифікація, маркування і застосування легованих сталей / Основи металознавства [Електронний ресурс] — Режим доступу: <http://ua.textreferat.com/referat-1515-5.html>. — Дата доступу: 16.04.2019.
3. Чавун [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Чавун>. — Дата доступу: 16.04.2019.
4. Шиліна О. П. Лаб. роб. №7. Вивчення мікроструктури та властивостей чавунів / О. П. Шиліна, О. В. Шаповалова // Матеріалознавство: електр. навч. посібн. Вінницького націон. техн. університету [Електронний ресурс] — Режим доступу: <http://posibnyku.vntu.edu.ua/mat/7.htm>. — Дата доступу: 20.04.2019.
5. Свойства и классификация чугуна / уч. файлы Таврийского национального университета [Електронний ресурс] — Режим доступу: <http://www.tnu.in.ua/study/refs/d12/file65258.html>. — Дата доступу: 25.04.2017.
6. Nofal A. Advances in the Metallurgy and Applications of ADI / Adel Nofal // Journal of Metallurgical Engineering. – 2013, Vol 2, Iss. 1. – pp. 1 – 18.
7. Найдек В. Л. Бейнитный высокопрочный чугун / В. Л. Найдек, В. П. Гаврилюк, И. Г. Неижко; Нац. академия наук Украины, Физико-технологический институт металлов и сплавов. – Киев, 2008. – 149 с.
8. Ritchie I. G. High-damping metals and alloys / I. G. Ritchie, Z.-L. Pan // Metallurgical Transactions. — 1991. — Vol, 22, Issue 3. — pp. 607 – 616.
9. Zhang J. Documentation of damping capacity of metallic, ceramic and metal-matrix composite materials / J. Zhang, R. J. Perez, E. J. Lavernia // Journal of Materials Science. — 1993. — Vol. 8. — pp. 2395 – 2404.

10. Писаренко Г. С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Справочник / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев: Наук.думка, 1971. – 375 с.
11. М. В. Коваленко. Влияние температуры и условий нагружения на характеристики износа бейнитного чугуна / К. А. Гогаев, Ю. Н. Подрезов, М. В. Коваленко // Проблемы тертя та зношування, 3 (76). – 2017. – с. 42 – 51.
12. Keough J. R. Agricultural Applications of Austempered Iron Components / J. R. Keough, T. Dorn, K. L. Haurynen, V. Popovski // Applied Process Inc.-Technologies Div., Livonia. — 2009. — pp. 28 – 31.
13. Волощенко С. М. Створення наукових засад структуроутворення в чавуні для підвищення зносостійкості змінних деталей сільгосптехніки та транспорту: дис. док. техн. наук. Матеріалознавство 05.16.02. / С. М Волощенко. — Київ, 2017. — 236 с.
14. Структура и свойства чугуна с шаровидным графитом, модифицированного лигатурами ЖКМК, никель-магний, и медь-магний / Л. И. Леви, С. Ж. Жалимбетов, А. Н. Буянов, Ю. Н. Мищакон // X Всесоюзная конференция по высокопрочному чугуну, К., ИПЛ АН УССР, 1977. — С.163 - 165.
15. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках / Н. Г. Гиршович. — М-Л. : Машиностроение, 1966. — 562 с.
16. Модификаторы композиционные комплексные в виде проката / М. В. Волощенко, О. А. Катрус, Л. М. Настенко, А. И. Отрок // Новые высокопроизводительные технологические процессы, высококачественные сплавы и оборудование в литейном производстве. — К., 1990 — с. 112 – 114.
17. Волощенко М. В. Эффективность производства и применение высокопрочного чугуна / М. В. Волощенко, В. П. Коробкою. — К. : УкрНИИТИ, 1990. — с. 13.
18. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э. В. Захарченко, Ю. Н. Левченко, В. Г. Горенко, П. А. Вареник П.А. — К. : Наукова думка, 1986. — с. 248.

19. Дяченко С. С. Фізичні основи міцності та пластичності металів [Текст] : навч. посіб. / С. С. Дяченко. — Харків : Видавництво ХНАДУ, 2003. — 226 с.
20. Холявко В.В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів: Навчальний посібник для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / В.В. Холявко, І.А. Владимирський, О.О. Жабинська. — К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 156 с.
21. Ударна в'язкість [Електронний ресурс] — Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Ударна\\_в'язкість](https://uk.wikipedia.org/wiki/Ударна_в'язкість). — Дата доступу: 30.04.2019.
22. Механические испытания. Ударная вязкость [Електронний ресурс] — Режим доступу: <http://www.materials.kiev.ua/departments/008/MechTest.files/page0016.htm>. — Дата доступу: 29.04.2019.
23. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов : учебник для вузов / В. С. Золоторевский. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
24. Копры маятниковые. Технические условия : ГОСТ 10708-82. — Введен в действие 1983-07-01. – М. : ИПК Издательство стандартов. – 8 с.
25. ДСТУ EN 10045-1:2006. Матеріали металеві. Випробування на ударний вигин за Шарпі. Частина 1. Метод випробування (EN 10045 1:1990, IDT) [Електронний ресурс] — Режим доступу: [http://document.ua/materiali-metalevi\\_viprobuvannja-na-udarnii-vigin-za-sharpi-nor27901.html](http://document.ua/materiali-metalevi_viprobuvannja-na-udarnii-vigin-za-sharpi-nor27901.html). — Дата доступу: 20.04.2019.
26. Писаренко Г.С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Справочник / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. — Киев, : Наук.думка, 1971. — 375 с.
27. Mann G.E. Reversible plastic strain during cyclic loading–unloading of Mg and Mg–Zn alloys / G.E. Mann, T. Sumitomo, C.H. Caceres, J.R. Griffiths // Materials Science and Engineering. — 2007. — Vol. 456. — pp. 138 – 146.

28. C´aceres C.H. Pseudoelastic behaviour of cast magnesium AZ91 alloy under cyclic loading–unloading / C.H. C´aceres, T. Sumitomo, M. Veidt // *Acta Materialia*. – 2003. — Vol. 51, Issue 20. — pp. 6211 – 6218.

29. Nagarajan D. Anelastic Behavior of Mg-Al and Mg-Zn Solid Solutions / D. Nagarajan, X. Ren, C. H. Cáceres // *Materials Science & Engineering*. — 2017. — Vol. 681. — pp. 387 – 392.

30. Molnar P. Reversible motion of twin boundaries in AZ31 alloy and new design of magnesium alloys as smart material / P Molnar, A. Ostapovets, A Jager // *Materials and Design*. — 2014. Vol. 56. — pp. 509 – 516.

31. Методичні вказівки до виконання спецпрактикуму з мікроскопії, спектроскопії та термічного аналізу твердих тіл: / З. З. Зиман, М. В. Ткаченко, В. І. Глушко, Л. П. Подус. — Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2008. — 40 с.

32. Волощенко С. М. Термічна обробка лемешів із високоміцного чавуну / С. М. Волощенко, В. І. Ульшин, М. Г. Аскеров, М. Д. Бега, С. В. Ульшин / *Металознавство та обробка металів*. — ФТІМС, № 4. — 2009. — С. 25 – 31.

33. Влияние температуры и условий нагружения на характеристики износа бейнитного чугуна / К. А. Гогаев, Ю. Н. Подрезов, М. В. Коваленко [та ін.] // *Проблеми тертя та зношування*. — 2017. — 3 (76). — С. 42 – 51. — ISSN 03702197.

34. Зміна механічної поведінки бейнітного високоміцного чавуну із кулястим графітом під впливом термо-механічної обробки / М. В. Коваленко, В. В. Холявко, Т. О. Іващук, С. М. Волощенко // *Матеріали для роботи в екстремальних умовах: 7-ма міжнар. науково-технічна конф.*, 30 лист. – 01 груд. 2017 р. Київ, Україна : матеріали конф. — Київ, 2017. — С. 134 – 137.

35. Коваленко М. В. Температурна чутливість параметрів зношування бейнітного чавуну / М. В. Коваленко, В. В. Холявко // *Прикладні науково-технічні дослідження: Перша міжнар. інтернет-конференція*. – 5 – 7 квіт. 2017 р. Івано-Франківськ, Україна: матеріали конф. — С. 50.

36. Деформаційне зміцнення бейнітного чавуну при підвищених температурах / Т. О. Іващук, С. М. Волощенко, Ю. М. Подрезов, В. В. Холявко. // *Металознавство та обробка металів : наук.-техн. журн. / Фіз.-технол. ін-т металів і сплавів, Нац. акад. наук України, Нац. техн. ун-т України КПІ ім. Ігоря Сікорського.* — №1, 2017. — С. 17 – 22. — ISSN 2073-9583.

37. Влияние остаточного аустенита на механические свойства и характеристики износа бейнитного чугуна с шаровидным графитом // К. А. Гогаев, С. М. Волощенко, Ю. Н. Подрезов [и др.] // *Электронная микроскопия и прочность материалов.* — № 21, 2016. — с. 38 –50.

38. Волощенко С.М. Особливості бейнітного високоміцного чавуну з огляду виробництва швидкозношуваних змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки / С. М. Волощенко, К. О. Гогаєв, М. Г. Аскеров, Ю. М. Подрезов // *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* — №4, 2017. — С. 81 - 87.

39. Kovalenko M. Wear Feature of Bainitic Cast Iron Used In Agricultural Machinery/ S. Voloschenko, Y. Podrezov, V. Kholiyavko, M. Kovalenko // *Металознавство та обробка металів.* — №3, 2017. — С. 28 – 33.

40. Otsuka K. Physical metallurgy of Ti–Ni–based shape memory alloys / K. Otsuka, X. Ren // *Progress in Materials Science.* — 2005. — Vol. 50. — pp. 511 - 678.

41. Косевич А. М. Дислокационная теория упругого двойникования кристаллов / А.М. Косевич, В. С. Бойко // *УФН*, 1971. — Т. 104, вып. 2. — С. 202 – 254.

42. Krzynska A. The Mystery of ADI / A. Krzynska, M. Kaczorowski // *Archives of Foundry Engineers.* — 2007. — Vol.7, Issue 4. — pp. 111 – 114.

43. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ — Редакція від 20.01.2018 [Електронний ресурс] — Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>. — Дата доступу: 17.04.2019.

44. Экономика труда и социально-трудовые отношения / Под ред Г. Г. Мешовяна, Р. П. Колосовой. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. — 184 с.

45. Будинки адміністративного та побутового призначення ДБН В.2.2 28: 2010 / Державні будівельні норми України – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. — 34 с.
46. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: ДСН 3.3.6.042-99. — К. : 1999. — 10 с.
47. Розділ з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях у магістерських дисертаціях: Рекомендації до виконання: навч. посіб. для студ. спеціальності 132 «Матеріалознавство» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. Г. Левченко. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. — 24 с.
48. Природне і штучне освітлення : ДБН В 2.5-28-2006 . — К.: Мінбуд України, 2006. – 9 с.
49. Правила охорони праці під час експлуатації ЕОМ : НПАОП 0.00 1.28-10. – К.: Міністерство юстиції України, 2010. — 8 с.
50. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. – К.: Міненерговугілля України, 2017. — 617 с.
51. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій, № 424/3717 : НПАОП 0.00-4.33-99. — К.: Міністерство юстиції України, 1999. — 5 с.
52. Безпечність промислових підприємств. Загальні положення та вимоги : ДСТУ 3273-95. — К. : НТЦ з ядерної та радіаційної безпеки при Держкомітеті України з ядерної і радіаційної безпеки, 1995. — 16 с.
53. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок : НПАОП 40.1-1.32-01. — К. : Держстандарти України, 2001. — 78 с.
54. Пожежна безпека об'єктів будівництва : ДБН В.1.1.7–2002. — К. : Держбуд України, 2003. — 36 с.
55. Гандзюк М. П. Основи охорони праці / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський. — К. : Каравела, 2011. — 384 с.
56. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою : ДСТУ Б В.1.1-36:2016. — К.: Держстандарт України, 1999.

57. Сільське господарство України [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Сільське\\_господарство\\_України](https://uk.wikipedia.org/wiki/Сільське_господарство_України). — Дата доступу: 16.05.2019.