

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут матеріалознавства
та зварювання ім. Є.О. Патона**

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

«___» _____ 2024 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг та комп'ютерне
моделювання в матеріалознавстві»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»**

**на тему: «Вплив вмісту Fe на структуру та властивості сплавів з пам'яттю
форми на основі Cu-Al-Mn та Cu-Mn»**

Виконав:

здобувач ВО IV курсу, групи ФМ-01

Тітенко Олексій Анатолійович

Керівник:

к.т.н., Конорев Сергій Ігорович

Консультант з розділу охорони праці:

зав. каф., д.т.н., професор Левченко О. Г.

Консультант з економічно-організаційного розділу

к.е.н., доцент Нараєвський С. В.

Консультант з питань нормоконтролю:

ст. викл. Шаповалова Н.А.

Рецензент:

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Здобувач ВО _____

Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут матеріалознавства
та зварювання ім. Є.О. Патона
Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу здобувачу ВО

Тітенко Олексію Анатолійовичу

1. Тема роботи «Вплив вмісту Fe на структуру та властивості сплавів з пам'яттю форми на основі Cu-Al-Mn та Cu-Mn», керівник роботи Конорев Сергій Ігорович, к.т.н., затверджені наказом по університету від «30» __05__ 2024 р. № __2210-с__

2. Термін подання здобувачем ВО роботи _____

3. Вихідні дані до роботи: зразки сплавів з СПФ на основі Cu-Al-Mn та Cu-Mn; дані з літературних джерел та результатів попередніх особистих експериментів; результати переддипломної практики.

4. Зміст роботи: літературний огляд; матеріали та методика досліджень; результати та їх обговорення; економічна частина; охорона праці.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 62 сторінки, 14 таблиць; 20 рисунка; 1 презентація.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно економічна частина	Нараєвський С.В. доцент		
Охорона праці	Левченко О.Г. зав. каф., професор		
Нормоконтроль	Шаповалова Н.А. ст. викл.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Видача завдання	15.04.2024	
	Опрацювання літературних джерел	16.04.2024	
	Опанування методик дослідження	25.04.2024	
	Проведення експерименту	10.05.2024	
	Аналіз отриманих результатів	30.05.2024	
	Оформлення дипломної роботи	06.06.2024	
	Попередній захист	07.06.2022	
	Захист на засідання ЕК	17.06.2024	

Здобувач ВО

Олексій ТІТЕНКО

Керівник

Сергій КОНОРЕВ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 62 сторінки, 14 таблиць, 20 рисунків, 7 формул, 44 літературних джерела.

ЕЛЕКТРОННИЙ ПАРАМАГНІТНИЙ РЕЗОНАНС, МАРТЕНСИТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ, СИСТЕМИ Cu-Al-Mn-Fe, Cu-Mn-Fe, СПЛАВИ ГЕЙСЛЕРА, СПЛАВИ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ.

Об'єкт дослідження: зразки сплавів з пам'яттю форми на основі Cu-Mn-Al та Cu-Mn з різним вмістом Fe.

Предмет дослідження: функціональні властивості сплавів з пам'яттю форми на основі Cu-Mn-Al та Cu-Mn з різним вмістом Fe.

Мета роботи: визначення впливу вмісту Fe на структуру та властивості сплавів з пам'яттю форми на основі Cu-Mn-Al та Cu-Mn.

Методи дослідження: метод електронного парамагнітного резонансу, метод резистометрії, метод безперервного вдавлювання індентора.

Результати дослідження та їх новизна: практично доведено, що варіювання кількості Fe у сплавах з пам'яттю форми на основі Cu-Al-Mn та Cu-Mn дозволяє керувати характеристичними температурами мартенситного перетворення (і відповідно встановлювати необхідні робочі температури їх використання), а також впливає на магнітні характеристики цих сплавів, що дозволяє значно розширити область їх використання.

ABSTRACT

Attestation bachelor work: 62 pages, 14 tables, 20 figures, 7 formulas, 44 references.

ELECTRONIC PARAMAGNETIC RESONANCE, HEISLER COMPOUNDS, MARTENSITIC TRANSFORMATION, SHAPE MEMORY FUSIONS, SYSTEMS Cu-Al-Mn-Fe, Cu-Mn-Fe.

Object of study: samples of shape memory alloys based on Cu-Mn-Al and Cu-Mn with different Fe content.

Subject of research: functional properties of shape memory alloys based on Cu-Mn-Al and Cu-Mn with different Fe content.

Objective: to determine the effect of Fe content on the structure and properties of shape memory alloys based on Cu-Mn-Al and Cu-Mn.

Research methods: electron paramagnetic resonance method, resistometry, continuous indentation test method.

Research results and their novelty: it has been practically proved that varying the amount of Fe in Cu-Al-Mn and Cu-Mn -based alloys allows controlling the characteristic martensitic transformation temperatures (and, accordingly, setting the required operating temperatures for their use), and also affects the magnetic characteristics of these alloys, which can significantly expand the scope of their use.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	9
1.1 Сплави з пам'яттю форми	9
1.2 Мартенситне перетворення у сплавах з пам'яттю форми на основі Cu	10
1.3 Сплави Гейслера.....	14
1.4 Висновки до розділу 1.....	18
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	19
2.1 Матеріали досліджень.....	19
2.2 Метод електронного парамагнітного резонансу.....	21
2.3 Методика визначення питомого електроопору металевих систем від температури.....	23
2.4 Визначення мікротвердості методом безперервного вдавлювання індентора	26
2.5 Висновки до розділу 2.....	29
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	30
3.1 Результати досліджень електронного парамагнітного резонансу.....	30
3.2 Результати параметрів мартенситного перетворення у СПФ з використанням методу резистометрії.....	33
3.3 Результати визначення механічних властивостей четверних сплавів.....	34
3.4 Висновки до розділу 3.....	35
4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	36
4.1 Науково-технічна актуальність теми дослідження.....	36
4.2 Розрахунок витрат та проведення НДР.....	36
4.2.1 Витрати на оплату праці.....	37
4.2.2. Визначення розміру єдиного соціального внеску.....	38
4.2.3 Матеріали необхідні для проведення досліджень.....	38
4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання.....	39
4.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій.....	39

	7
4.2.6 Визначення витрат на службові відрядження.....	40
4.2.7 Інші прямі невраховані витрати по темі.....	40
4.2.8 Накладні витрати.....	40
4.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми	40
4.3 Науково-технічна ефективність НДР.....	41
4.4 Висновки до розділу 4.....	44
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	45
5.1 Аналіз параметрів приміщення.....	45
5.2 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів.....	47
5.2.1 Мікроклімат робочої зони.....	48
5.2.2 Аналіз освітленості приміщення.....	49
5.2.3 Аналіз шуму, вібрації, інфра- та ультразвуку.....	49
5.3 Безпека при роботі з електричними приладами.....	50
5.4 Пожежна безпека.....	51
5.5 Алгоритм дій у випадку "Повітряної тривоги" за сигналом цивільного захисту.....	53
5.6 Висновки до розділу 5.....	53
ВИСНОВКИ	54
CONCLUSIONS	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

ВСТУП

Сплави з пам'яттю форми це функціональні матеріали, які мають унікальні властивості – здатність до структурних перетворень під впливом зовнішніх факторів, а також можливість повернення до попередньої форми після деформації. Наявність цієї властивості робить ці сплави незамінними у аерокосмічній, машинобудівній, медичній та інших галузях. Область і об'єм використання таких матеріалів з кожним роком розширюється, відповідно до попиту спостерігається і зростання інтересу до досліджень сплавів з пам'яттю форми, а відкриття нових методів синтезу, вдосконалення технологій обробки надають можливість.

Наразі особливої актуальності набуває новий клас матеріалів – феромагнітні сплави з пам'яттю форми, які здатні створювати значні деформації. Перспективними кандидатами на цю роль є сплави на основі Cu-Mn-Al та Cu-Mn до яких додають до 3 % Fe. Саме дослідженню цих матеріалів присвячена ця робота. Властивості цих матеріалів напряму залежать від того яке місце в структурі матеріалу буде займати Fe. Оскільки його кількість порівняно мала, то для дослідження цього питання був обраний метод електронного парамагнітного резонансу. Однією з вирішальних характеристик сплавів з пам'яттю форми, від якої залежить напрямок їх використання, є температурний інтервал прямого і оберненого мартенситного перетворення. В цій роботі цей температурний інтервал визначається методом резистометрії. Для дослідження механічних характеристик застосовувався метод безперервного вдавлювання індентора.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Сплави з пам'яттю форми

Для ширшого використання сплавів з пам'яттю форми (СПФ) в промисловості та медицині необхідна наявність у них комбінації таких властивостей: високотемпературна область перетворення, низька собівартість виробництва та простота виробничого процесу.

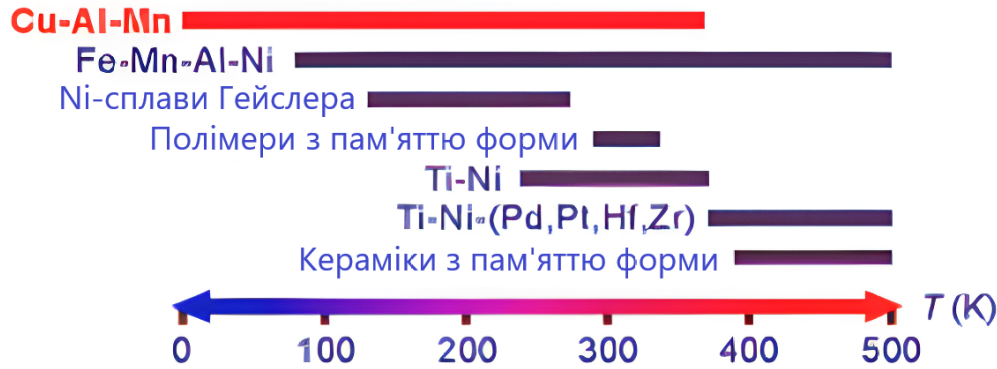
Фізичні, хімічні та електричні властивості СПФ можуть змінюватися при фазових перетвореннях, додаванні різних легуючих елементів, деформації та термічній обробці [1, 2].

Феромагнітні сплави з пам'яттю форми (ФСДФ) – це новий клас розумних матеріалів. Їх можна використовувати у космічній техніці, автомобілебудуванні та робототехніці для інженерних застосувань [1, 2, 3].

Водночас постійно розвиваються і вдосконалюються технології виготовлення нових сплавів міді, які побудовані на нових принципах та засадах, що пов'язані з використанням надвисоких температур та тиску, лазера, плазми, електропорошкової металургії, енергії вибуху, самопоширюваного високотемпературного синтезу, електро- і магнітоімпульсної обробки, модифікування поверхневих шарів, тощо [4]. Зазначені технології дають можливості одержувати та синтезувати матеріали, які раніше людство не лише не використовувало, але й не знало, або взагалі, які в природному стані не зустрічаються (надтверді, надміцні, жаростійкі, функціональні та багатофункціональні) [5].

Проглядається посилена тенденція до дослідження та застосування СПФ [4]. На рис. 1.1 показано області застосування та найбільш придатні температури використання [6]. Одним з найрозповсюджених СПФ є сплави на основі Cu-Al-Mn (рис. 1.1).

Сплави з пам'яттю форми



Існуюче та потенційне застосування

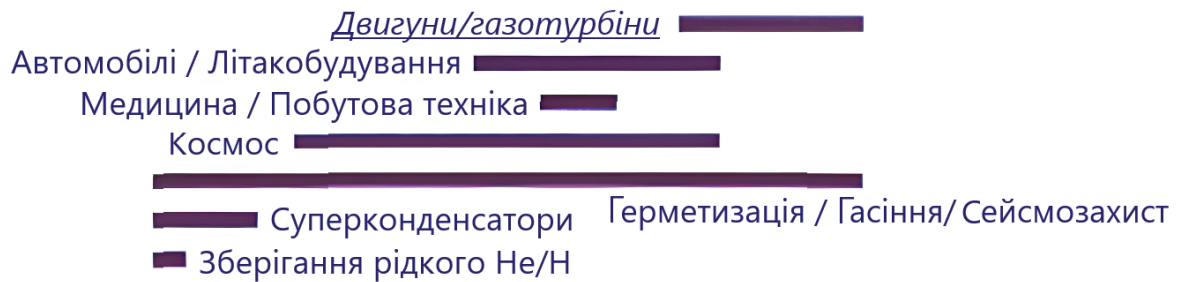


Рисунок 1.1 – Застосування та основні робочі температури СПФ [6]

Як видно з рис. 1.1, СПФ на основі Cu-Al-Mn мають один з найширших температурних діапазонів використання завдяки своїм якісним функціональним механічним властивостям, що робить їх придатними для багатьох застосувань [6].

1.2 Мартенситне перетворення у сплавах з пам'яттю форми на основі Cu

Нові призначення деяких конструкційних матеріалів з'явилися завдяки термопружному мартенситному перетворенню (ТП), яке вперше виявив В.Г. Курдюмов у сплаві Cu-Zn, а згодом і в сплавах Cu-Al-Ni. Це явище стало основою ефекту пам'яті форми (ЕПФ), відкритого зусиллями У. Бюгера та Ф. Ванга. В свою чергу, ці відкриття дали значний імпульс для створення нового класу ФСПФ на основі міді [7].

В системі Cu-Al (рис. 1.2) ЕПФ утворюється переважно в результаті гартування з високотемпературної області фазової діаграми з β -фази (ОЦК гратка).

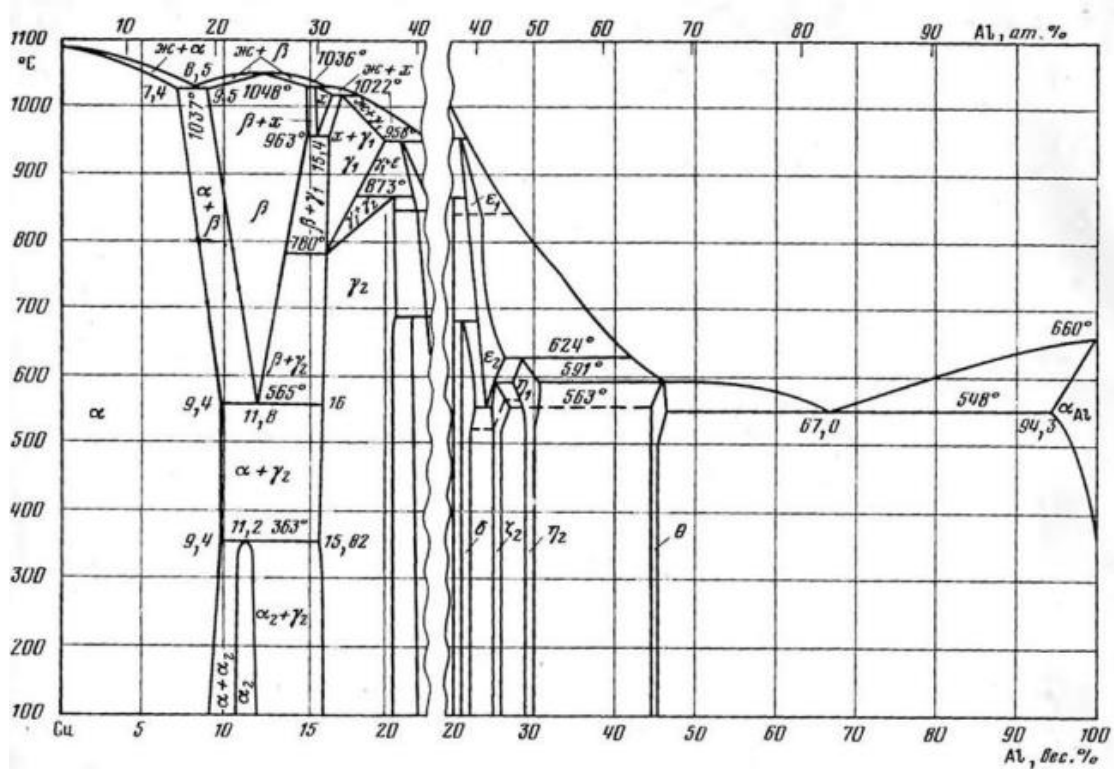


Рисунок 1.2 – Фазова діаграма станів бінарної системи Cu-Al [8]

В системі Cu-Mn (рис. 1.3) ЕПФ утворюється переважно в результаті гартування з області фазової діаграми з γ -фази.

СПФ на основі міді мають деякі переваги, наприклад низьку вартість і просту процедуру виготовлення в порівнянні наприклад зі сплавами Ti-Ni. Сплави потрібні Cu-Zn-Al і Cu-Al-Ni широко вивчені і вони також мають комерційний успіх.

Інші поширені промислові сплави відносяться до Cu-Al-Mn і Cu-Al-Be сплавів. Однак застосування цих сплавів має обмеження, в основному, з двох причин: малу пластичність і оброблюваність полікристалічних сплавів в результаті великого зерна, високої пружної анізотропії і виділення крихкої другої фази у вигляді частинок. Метастабільність обох вихідних ($B2$, $D0_3$ або $L2_1$) і мартенситної ($9R$ або $18R$) фаз сплавів призводить до складних ефектів

старіння, а отже, до небажаних властивостей [9]. Оскільки сплави Cu-Al-Ni(Mn) мають набагато кращу термічну стабільність і вищі робочі температури, ніж сплави Cu-Zn-Al, вони можуть стати одним із кандидатів на практичні застосування у якості високотемпературних СПФ за умови покращення їх технологічності [10].

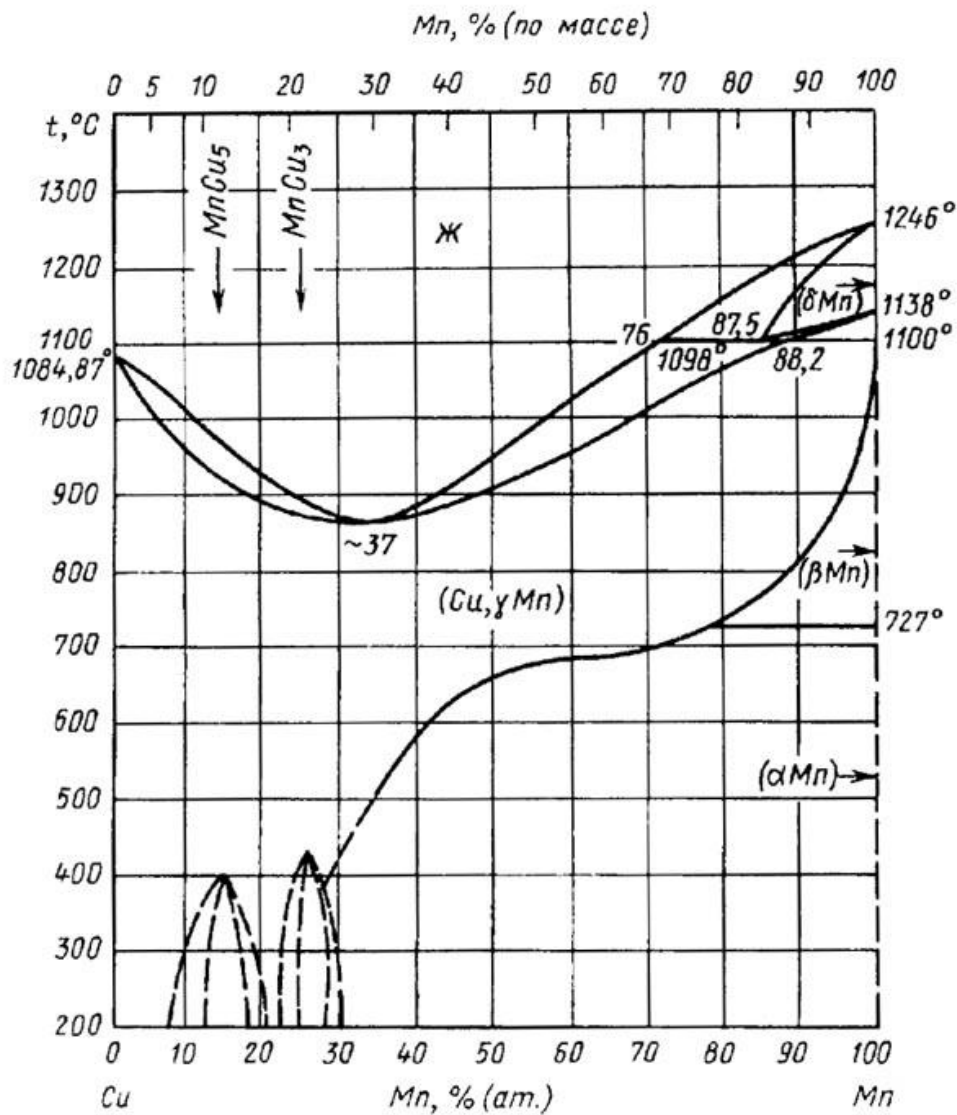


Рисунок 1.3 – Фазова діаграма станів бінарної системи Cu-Mn [8]

Сплави Cu-Al-Mn мають достатньо високі механічні показники в широких інтервалах прояву зворотних деформаційних ефектів. Недоліком є мала пластичність і оброблюваність полікристалічних сплавів з великим зерном, що обумовлено високою пружною анізотропією $A = \frac{c_{44}}{c'} \sim 12-13$, відносно

пружноізотропних сплавів Ni-Ti з $A \sim 1-2$ [10] і виділення частинок крихкої фази. До зниження пластичності призводить також гетерогенний розпад, особливо в крупнозернистому стані. Додавання до бінарних сплавів Mn ефективно сприяє збільшенню пластичності, надпружності та ЕПФ [11] і стимулює виникнення гігантського магнітоопору.

Визначено, що в сплавах Cu-Al-Mn з вмістом алюмінію менше 18% проявляється значний ЕПФ і вища пластичність, ніж у сплавах Cu-Al-Ni під час фазових переходів. Однак загальна надпружність (НП) обмежена лише 2% замість 8%, які досягаються в Cu-Zn-Al, і майже 10%, які можливі в Cu-Al-Ni [9]. Висока пластичність, більша за 11%, реалізується в сплаві $\text{Cu}_{71,5}\text{Al}_{17,5}\text{Mn}_{11}$ зі стовпчастою $\langle 001 \rangle$ текстурою зерна [12]. Головним чинником малої НП в Cu-Al-Mn сплавах з дрібнозернистою структурою є обмеження, пов'язане з малою величиною відношення розміру зерна аустеніту до товщини зразка, яке спричиняє ефект затиснення.

В сплаві Cu-17 % Al-15 % Mn до 273 K не виявлено ТМП, а НП складає 8,5 % за 77 K. Критичні напруження для індукованого ТМП зменшуються з пониженням температури, а його градієнт стає меншим за низьких температур через зменшення ентропії, яка за 77 K становить 0,46 Дж/(моль·K) і дорівнює третині від такої за 221 K [13].

Монокристал Cu-12,4 % Al-6.5 % Mn-3.2 % Fe за кімнатної температури демонструє повний НП – 7 %, а також керований ЕПФ до 8,8 %. Монокристал з ЕПФ Cu-12,9 % Al-5,6 % Mn-3,8 % Fe одночасно проявляє повний НП – 12 % в першому циклі навантаження та ЕПФ 9 % при двократному циклічному навантаженні за кімнатної температури [13].

Для керування механічними характеристиками феромагнітних металевих матеріалів додатковими важелями впливу може слугувати накладання постійних або змінних магнітних полів під час деформації, що позначається на величинах: межі плинності та міцності, видовженні, повзучості, втомної міцності та релаксації напружень. Наявність магнітного поля при пластичній деформації може спричиняти як ефект розміцнення (позитивний магнітопластичний ефект

(МПЕ)), так і ефект зміцнення (від'ємний МПЕ) матеріалів під впливом магнітного поля різної природи [14].

1.3 Сплави Гейслера

Історію одного з найцікавіших класів матеріалів можна простежити з 1903 року, коли Фріц Гейслер виявив, що сплав зі складом Cu_2MnAl поводить себе як феромагнетик, хоча жоден з його складових елементів сам по собі не є магнітним. Цей матеріал і його аналоги, які на сьогоднішній день складають величезну колекцію з більш ніж 1000 сплавів, тепер відомі як сплави Гейслера. Це потрібні напівпровідникові або металеві матеріали зі стехіометрією 1:1:1 (також відомі як фази "напів-Гейслера") або стехіометрією 2:1:1 [15].

У минулому сплави Гейслера часто відносили, переважно, до інтерметалічних сплавів. Хоча опис як інтерметалічного з'єднання є більш доречним через їх характерний порядок атомів. Потрібні сплави Гейслера мають загальну формулу X_2YZ , де X і Y – перехідні метали, а Z – елемент основної групи (рис. 1.4) [15]. Однак в деяких випадках в якості Y виступають рідкоземельні елементи або лужноземельні метали. Величезна кількість матеріалів Гейслера може бути сформована комбінацією різних елементів [6].

В 30-х роках 20 століття було визначено, що кристалічна структура впорядкована з гранецентрованою кубічною решіткою [16]. На жаль, в наступні десятиліття вони майже забулися, і в 1970-х роках було опубліковано лише кілька повідомлень про синтез нових сплавів Гейслера [17]. Лише після передбачення напів-металічного феромагнетизму в системі Mn-Ni-Sb Грутом та співавторами [18] та у Co_2MnSn Кублером у 1983 році, науковий інтерес до сплавів Гейслера повернувся.

X_2YZ Heusler compounds

H 2.20																	He
Li 0.98	Be 1.57											B 2.04	C 2.55	N 3.04	O 3.44	F 3.98	Ne
Na 0.93	Mg 1.31											Al 1.61	Si 1.90	P 2.19	S 2.58	Cl 3.16	Ar
K 0.82	Ca 1.00	Sc 1.36	Ti 1.54	V 1.63	Cr 1.66	Mn 1.55	Fe 1.83	Co 1.88	Ni 1.91	Cu 1.90	Zn 1.65	Ga 1.81	Ge 2.01	As 2.18	Se 2.55	Br 2.96	Kr
Rb 0.82	Sr 0.95	Y 1.22	Zr 1.33	Nb 1.60	Mo 2.16	Tc 1.90	Ru 2.20	Rh 2.28	Pd 2.20	Ag 1.93	Cd 1.69	In 1.78	Sn 1.96	Sb 2.05	Te 2.10	I 2.66	Xe
Cs 0.79	Ba 0.89		Hf 1.30	Ta 1.50	W 1.70	Re 1.90	Os 2.20	Ir 2.20	Pt 2.20	Au 2.40	Hg 1.90	Tl 1.80	Pb 1.80	Bi 1.90	Po 2.00	At 2.20	Rn
Fr 0.70	Ra 0.90																
		La 1.10	Ce 1.12	Pr 1.13	Nd 1.14	Pm 1.13	Sm 1.17	Eu 1.20	Gd 1.20	Tb 1.10	Dy 1.22	Ho 1.23	Er 1.24	Tm 1.25	Yb 1.10	Lu 1.27	
		Ac 1.10	Th 1.30	Pa 1.50	U 1.70	Np 1.30	Pu 1.28	Am 1.13	Cm 1.28	Bk 1.30	Cf 1.30	Es 1.30	Fm 1.30	Md 1.30	No 1.30	Lr 1.30	

Рисунок 1.4 – Періодична таблиця елементів [15]

Матеріали XYZ мають одну магнітну підрешітку [15]. Магнітні матеріали XYZ напів-Гейслера існують тільки коли $X = \text{Mn}$. Цей факт зумовлений локалізованою природою електронних рівнів Mn, які можуть нести магнітний момент. Експериментально слабкий момент магнітної індукції також виявлений для Ni та подальших перехідних металах. Серед відомих у літературі сплавів Гейслера, що містять рідкісноземельні елементи, більшість сплавів є напівпровідниковими або напівметалічними системами – це антиферомагнетики з низькими температурами Нееля [20]. Оскільки магнітні іони займають NaCl-підрешітку, а відстань між ними велика, то можна зробити припущення про наявність магнітної взаємодії, яка заснована на механізмі суперобміну. У літературі описано дуже мало феромагнітних сплавів напів-Гейслера, для прикладу це NdNiSb і VCoSb [21]. Mn, що містять сполуки Гейслера, є напівметалевими феромагнетиками з високими температурами Кюрі. У з'єднаннях Гейслера X_2YZ ситуація зовсім інша, оскільки два атоми X займають тетрадричні ділянки, що забезпечує магнітну взаємодію між атомами X і утворення другої, більш делокалізованої магнітної субрешітки [15]. Завдяки двом

різним магнітним під ґраткам сполуки Гейслера X_2YZ можуть виявляти різні магнітні явища (феромагнетизм, феромагнетизм і напівметалічний феромагнетизм) [15].

У вісімдесятих роках незвичайні магнітооптичні властивості ряду сплавів Гейслера спонукали до дослідження їх електронної структури, що призвело до несподіваного результату: залежно від напрямку обертання деякі матеріали Гейслера виявляють як металеві, так і ізоляційні властивості одночасно, що називається напівметалевим феромагнетизмом [18]. Де Гроот і його колеги розробили класифікаційну схему, вказуючи на те, що можна виділити три різних типи напівметалевого феромагнетизму [15].

Немалий вклад в дослідження сплавів Гейслера внесли роботи з резонансними методами ЕПР та ЯМР. Вони є потужним інструментом для отримання інформації про внутрішню будову атомів, розподілу та впливу елементів в сплавах, сполуках, тощо. За допомогою цих методів можна досліджувати перебіг різноманітних фазових перетворень, включаючи процеси старіння, легування, визначення дефектності структури, магнітні властивості фаз і т.п. [22, 23].

Треба зазначити, що резонансними методиками ще вкрай мало отримано інформації стосовно внутрішньої побудови та електрохімічного впливу між хімічними елементами сплавів зі структурою Гейслера. Є низка наукових праць, яка лише у незначній мірі проливає світло на внутрішні процеси, які відповідають за трансформацію подібних структур.

Автори роботи [24] за даними дослідження малокутового розсіювання нейтронів встановили, що у сплаві $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_9\text{Al}_9$ при його розпаді дальній феромагнітний порядок в результаті феромагнітного впорядкування в системі макроскопічних магнітних моментів (μ) складає близько $1100 \mu_B$ (μ_B магнетон Бора), він утворюється частинками стехіометричної фази Cu_2MnAl з середніми розмірами $d = 30 \text{ \AA}$ та з середньою міжчастковою відстанню $D = 30 \text{ \AA}$. В тонкій стрічці сплаву $\text{Cu}_{32}\text{Mn}_{35}\text{Al}_{33}$ за допомогою вимірювань ЯМР виявлено, що антиферомагнітні та феромагнітні кластери атомів Mn співіснують без дальнього

порядку. Аномальна поведінка питомого опору стрічок Cu-Mn-Al пояснюється $s-d$ взаємодією між електронами провідності та згрупованими атомами Mn. Об'єктами дослідження були високодисперсні порошки та компактні зразки сплаву Cu-13,1 % Mn-12,6 % Al, що знаходиться посередині між Cu_2MnAl та Cu_3Al . Після гартування-старіння такі зразки мають всі металографічні характеристики спінодального розпаду. Потрійна складова має структуру $L2_1$, а бінарна складова має близьку структуру $D0_3$. Параметри їх решітки відрізняються на 2 відсотки. У швидкозагартованих стрічках Cu-Mn-Al з більшими областями антиферомагнітної або феромагнітної фази розділ може існувати з міжфазними дефектами. Це пов'язано з тим, що обмеженням спінодальних сплавів Cu-Mn-Al є впорядкованість обох фаз. У стрічках може існувати аморфна фаза і впорядкована фаза [24].

Хоча матеріали Cu-Mn-Al не є феромагнітними, зазначимо, що спектри ЯМР для феромагнітної фази вивчені й описані в роботі [25]. Також в цих роботах описані гамільтоніани феромагнітної фази для ядер і для електронів, наведені результати експериментальних і теоретичних досліджень спінових хвиль [15].

На рис.1.5 узагальнені всі важливі аспекти, що стосуються цих виняткових матеріалів, починаючи від напівпровідників, металів і магнітів і закінчуючи топологічними ізоляторами з безліччю технологічних застосувань в спінтроніці, термоелектриці, оптоелектроніці і багато чого іншого [26]. У майбутньому неодмінно з'явиться багато захоплюючих дослідницьких проєктів, які використовують переваги своїх незліченних функцій. можуть бути розроблені нові, невідомі багатофункціональні властивості, і все це в рамках одного класу матеріалів сполук Гейслера.

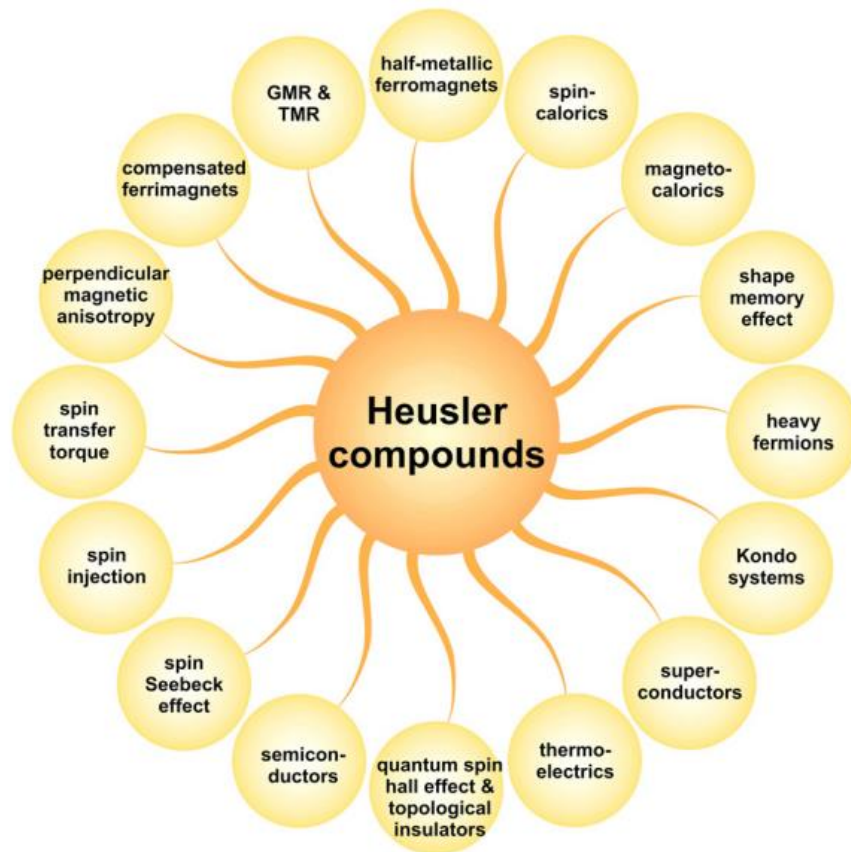


Рисунок 1.5 – Огляд застосування функціональних властивостей сплавів Гейслера для різних аспектів та призначень [15]

1.4 Висновки до розділу 1

В рамках огляду проведений системний аналіз функціональних можливостей використання сплавів з ефектом пам'яті форми. Показані умови та особливості за якими в сплавах типу Гейслера на основі Cu-Mn та Cu-Mn-Al протікають мартенситні перетворення і трансформації. Наведені дані свідчать про практичний потенціал для вдосконалення цих систем і покращення їх характеристик.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали досліджень

Для дослідження використовували три групи зразків, які відрізняються способом виготовлення та хімічним складом:

1. Cu-10,5 % Al-6 % Mn- x Fe ($x = 0; 0,5; 1; 2$ ат. %);
2. Cu-12,8 % Mn- x Fe ($x = 0; 0,1; 0,3; 0,5$ ат. %);
3. Cu-Al-Mn.

Детальний хімічний склад для кожної групи зразків наведений в таблицях 2.1.-2.3.

Таблиця 2.1 – Зразки сплавів Cu-Al-Mn-Fe

Номер зразка	Cu, ат. %	Mn, ат. %	Al, ат. %	Fe, ат. %
1	83,5	6,0	10,5	0
2	83,0	6,0	10,5	0,5
3	82,5	6,0	10,5	1,0
4	81,5	6,0	10,5	2,0

Таблиця 2.2 – Зразки сплавів Cu-Mn-Fe

Номер зразка	Cu, ат. %	Mn, ат. %	Fe, ат. %
5	87,1	12,8	0,1
6	86,9	12,8	0,3
7	86,7	12,8	0,5
8	86,2	12,8	1,0

Таблиця 2.3 – Зразки сплавів Cu-Al-Mn

Номер зразка	Cu, ат. %	Mn, ат. %	Al, ат. %
9	79,3	7,2	13,5
10	82,6	5,0	12,4

Зразки першої та другої групи були виплавленні в Стокгольському Університеті (Швеція). Комплексні сплави різного хімічного складу були

отримані методом електродугової плавки в інертній захисній атмосфері (Ar) з використанням міні-дугової плавильної системи МАМ-1 фірми Edmund Burler. Термічна обробка проводилась відповідно до технологічної карти (рис. 2.1). Після нагрівання до 850 °С проводився гомогенізуючий відпал для збільшення однорідності зразків по складу протягом 96 год, після якого відбувалось загартування (із області стабільності ОЦК-структури [8]), для отримання пересиченого твердого розчину, у воду за температури 0 °С. Після чого отримані сплави відпалювали за температури 200 °С в вакуумній камері протягом 3 годин. Частина зразків подрібнювалась до порошкоподібного стану для дослідження методом ЕПР.

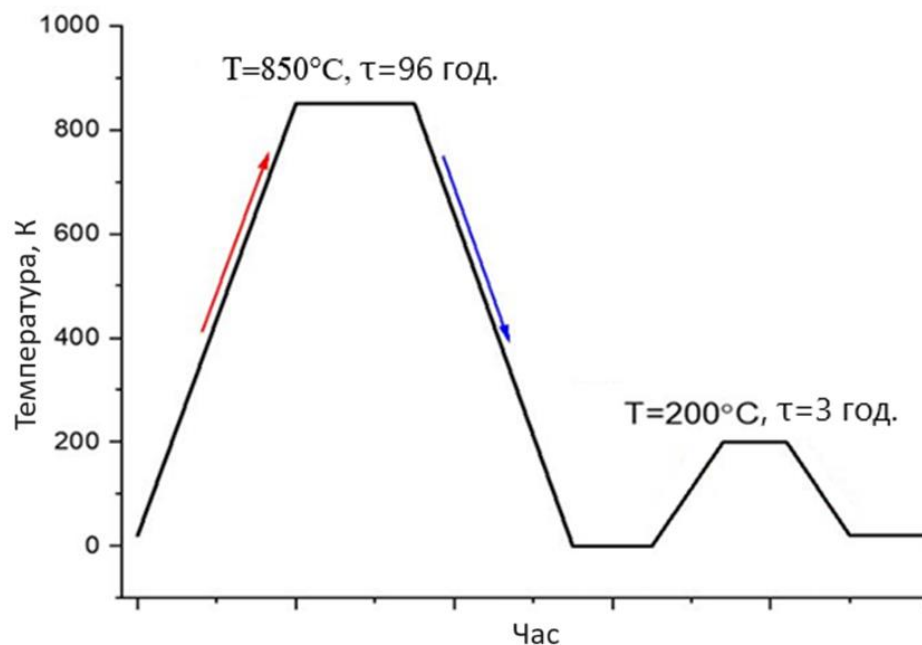


Рисунок 2.1 – Технологічна карта процесів обробки.

Зразки третьої групи були виготовленні в інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова. З тигля, навколо якого знаходиться індуктор для підтримання металу у розплавленому стані, струмінь розплавленого металу під деяким тиском, що забезпечує оптимальні умови для формування стрічки, через форсунку спрямовується на поверхню масивного мідного диску, що обертається.

Мідь має високу теплопровідність, яка забезпечує надшвидке охолодження розплаву у вигляді тонкої стрічки товщиною від 25 мкм до 100 мкм. Швидкість охолодження при спінінгуванні досягає від 10^4 °C/с до 10^7 °C/с. Товщина утвореної при спінінгуванні фольги залежить від діаметра струменя і лінійної швидкості охолоджуваного барабана (рис. 2.2). Для експериментальних досліджень описаних в цій роботі використовувались спінінговані тонкі стрічки Cu-Mn-Al товщиною від 30 мкм до 100 мкм.

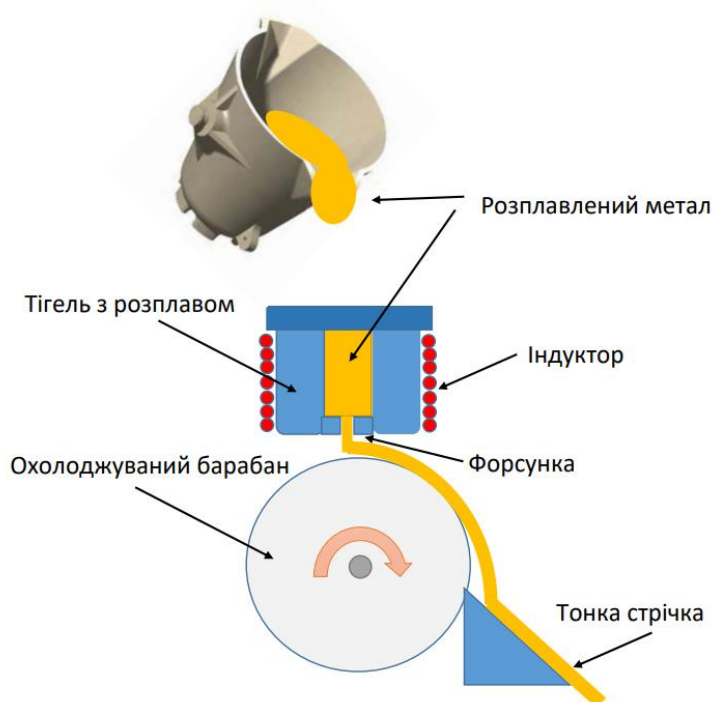


Рисунок 2.2 – Схема установки для виготовлення тонких стрічок спінінгуванням з розплаву

2.2 Метод електронного парамагнітного резонансу

Одною з перших металевих систем до якої застосовувалися методики ЕПР, ЯМР, була система Cu-Fe, в якій відбувається розпад твердого розчину під час старіння. Для порівняння в системі Cu-Fe ефект вивчення ЯМР використовувався до вивчення ще в 1976 році розподілу спінової щільності електронів провідності навколо домішкового атома заліза, розміщеного в мідній ґратці [27]. У випадку розбавленого твердого розчину Cu-Fe спектр ЯМР складається з головної

резонансної лінії поглинання та більш слабких сателітних [23]. Головна лінія виникає в результаті резонансного поглинання електромагнітної енергії змінного поля ядра ^{63}Cu , а сателітні лінії розміщуються подалі від атома міді поблизу від домішкового атома заліза. Ці лінії виникають внаслідок дії додаткових магнітних полів поблизу домішкового атома Fe на ядрах атомів Cu. І відповідно кожному типу сусідства в кристалічній ґратці між атомами Fe та Cu відповідає сателітна лінія поглинання. Внутрішні магнітні поля на ядрах Fe в частинках $\gamma\text{-Fe}$, які розміщені у Cu становлять приблизно від 23 кЕ до 27 кЕ [23].

Спін електронів викликає парамагнетизм, що пов'язано з ефектом Зеемана, який розщеплює енергетичні рівні в магнітному полі (рис. 2.3). Електрони з проекцією спіну $s = -1/2$ (магнітний момент уздовж поля) мають нижчу енергію, ніж електрони з $s = +1/2$ (магнітний момент проти поля) [28]. Різниця енергій між цими рівнями становить [29]:

$$\Delta\varepsilon = g\mu_B H, \quad (2.1)$$

де g – фактор Ланде (для вільного електрона $g = 2,0023$),

μ_B – магнетон Бора,

H – напруженість магнітного поля.

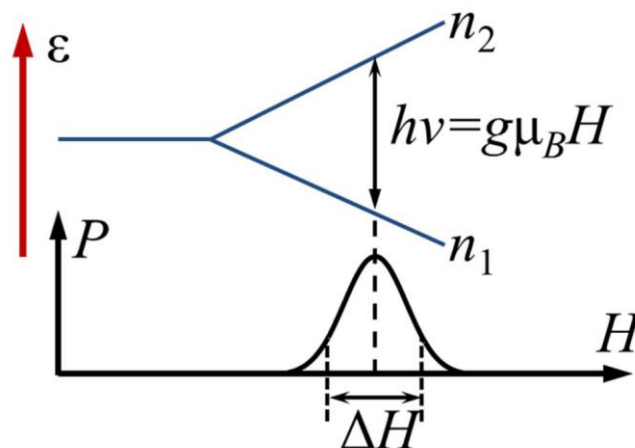


Рисунок 2.3 – Зееманівське розщеплення енергетичних рівнів електрона в магнітному полі і резонансне поглинання потужності P квантів радіочастотного випромінювання [28]

Коли атом переходить з одного рівня на інший, він або поглинає, або випромінює квант енергії. Поглинена енергія може бути енергією височастотного електромагнітного поля. Це поглинання є особливо інтенсивним за умов електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) [29]:

$$h\nu = g\mu_B H. \quad (2.2)$$

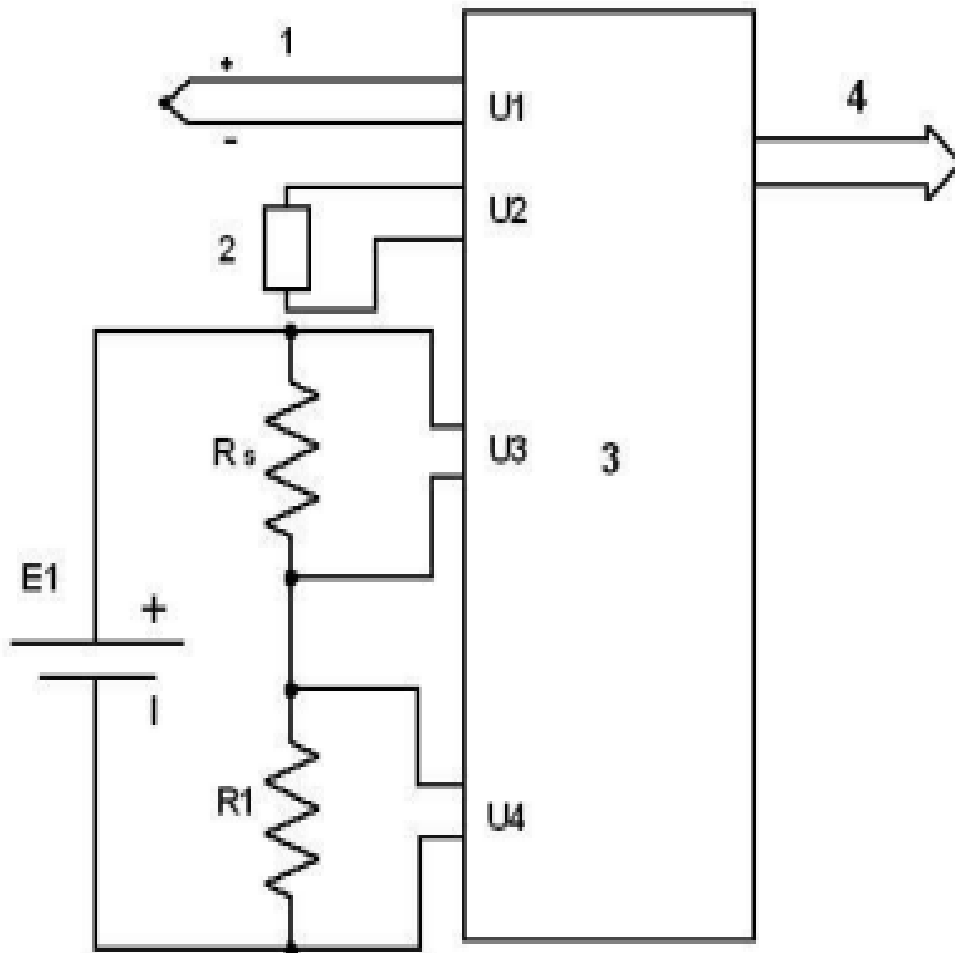
Формула визначає резонансне поле для найпростішого випадку вільного парамагнітного атома. Однак, коли атом знаходиться у складі рідини або твердого тіла, його енергія залежить не лише від зовнішнього магнітного поля, а й від взаємодії з оточуючими атомами, зокрема немагнітними. Це означає, що частота (або магнітне поле) парамагнітного резонансу є чутливою до властивостей середовища, яке оточує атом [24]. Завдяки цій особливості електронний парамагнітний резонанс (ЕПР) широко використовується як метод дослідження газів, рідин і твердих тіл [28].

В той же час нами досліджувалися сплави систем, у діапазоні частот від 6 ГГц до 14 ГГц за кімнатної температури на спектрометрі ЕПР Bruker ELEXSYS E580 з використанням високочастотного циліндричного SHQE SuperX High-Q резонатору з TE_{011} модою. Спектри ЕПР були записані з наступними параметрами: частота модуляції – 100 кГц, амплітуда модуляції – 0,1 мТ, потужність НВЧ – 0,04743 мВт, стала часу – 60 мс, роздільна здатність – 4096 точок. Симуляцію спектрів було проведено у програмному модулі Easyspin 5.2.36.

2.3 Методика визначення питомого електроопору металевих систем від температури

Для визначення залежності електричного опору зразків від температури використано пристрій, у якого температурні межі приблизно від -196 °С до 197 °С. Вимірювальний зразок розміщувався в горловині посудини Дьюара до якого під'єднувалися чотири дрові контакти приладу Р4833, для компенсації опору при кімнатній температурі. Принципова схема компенсаційного моста

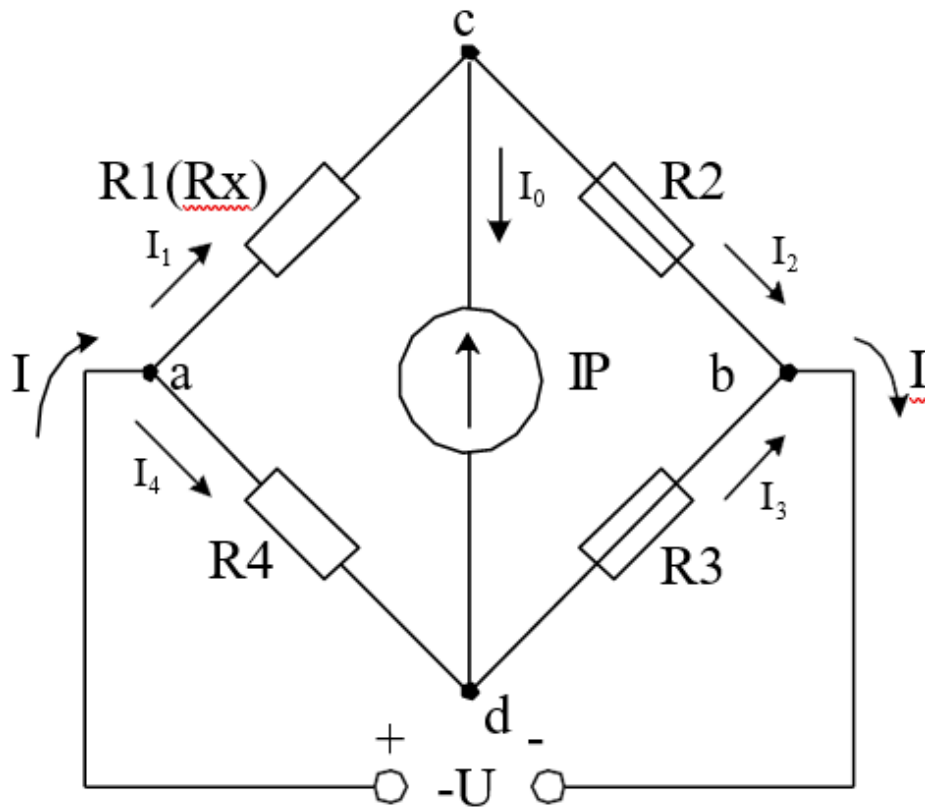
зображена на рис. 2.4. На зразок насувалась електропіч опору і припаювалась термопара мідь-константан. Температура контролювалась шляхом нагрівання резистивного елемента, який розміщувався в середині посудини Дюара, в середовищі рідкого азоту та призводив до його випаровування.



1 – термопара мідь-константан, 2 – термометр напівпровідниковий,
3 – блок АЦП, 4 – інтерфейс виведення даних, $E1$ – джерело постійного струму, $R1$ – опорний резистор, R – опір зразка, який вимірюється

Рисунок 2.4 – Принципова схема проведення резистометрії СПФ

Вимірювання залежності опору від температури відбувалося за 4-зондовою схемою. На рис. 2.5 зображена мостова схема для виміру питомих значень електроопору, в незалежності від температури навколишнього середовища [31].



R_1, R_2, R_3 і R_4 – плечі моста;

ab – діагональ моста, в яку подають живлення від джерела напруги U ;

cd – індикаторна діагональ, в яку увімкнено індикатор рівноваги моста.

Рисунок 2.5 – Компенсаційна схема моста постійного струму [31]

Характер зміни електроопору $\rho(T)$ (рис. 2.6) сплаву пов'язаний із протіканням у них мартенситного перетворення у вивченому інтервалі температур. На користь цього свідчить наявність характерного для мартенситних перетворень температурного гістерезису залежностей $\rho(T)$. Зростання електроопору (рис. 2.6) під час охолодження пов'язано з тим, що частина об'єму зразка в процесі мартенситного перетворення заміщується фазою, яка має вищі порівняно з високотемпературною значення ρ . Такий вид зміни опору з температурою характерний для сплавів з термopружним мартенситом на основі Cu [33].

Характеристичні температури мартенситного перетворення позначаються як: M_s, M_f, A_s, A_f , де A_s – температура початку зворотного $\gamma' \rightarrow \beta_1$ -перетворення, а

A_f – температура завершення, M_s – температура початку прямого $\beta_1 \rightarrow \gamma'$ перетворення, M_f – температура завершення та $\Delta T = A_f - M_s$ – гістерезис мартенситного перетворення [34].

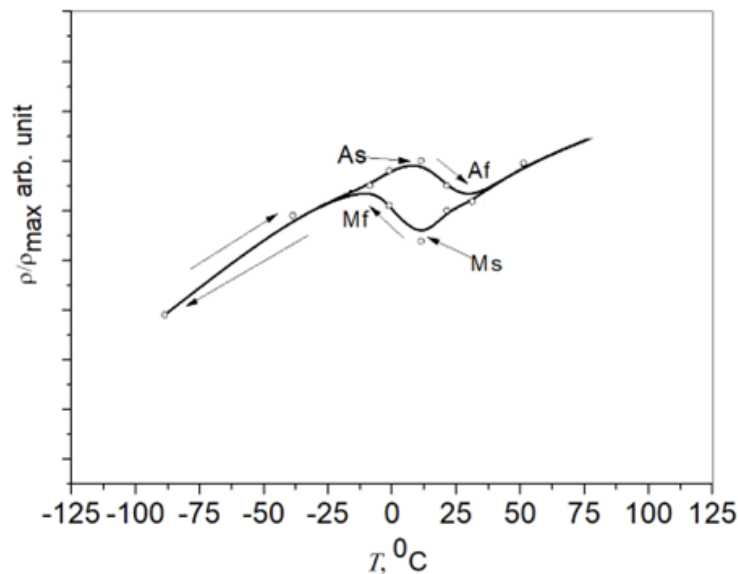


Рисунок 2.6 – Приклад температурної залежності зміни питомого електроопору $\rho/\rho_{\max}$ СПФ [34]

2.4 Визначення мікротвердості методом безперервного вдавлювання індентора

Вимірювання твердості в мілі - та мікрооб'ємах із застосуванням сучасних автоматичних методів запису та обробки діаграм вдавлювання знаходять все більш широке застосування в різних галузях науки та техніки. Порівняно простий та інформативний експрес метод неруйнівного визначення механічних властивостей твердого тіла охоплює необмежене коло матеріалів від м'яких до надтвердих: мінералів, металів, сплавів, напівпровідникових матеріалів, композитів та наноматеріалів, покриттів, тощо [35]. На базі експериментальних даних створили базу для порівняння різних твердих речовин не тільки за твердістю, але й за співвідношенням різних видів реакції об'єму, що деформується при навантаженні алмазного індентора.

Для визначення показників мікротвердості сплавів використовують стандартну методику перерахунку мікротвердості по Берковичу [36]:

$$H = \frac{1570 \cdot P}{h^2}, \quad (2.3)$$

де P – навантаження (г),

h – глибина вдавлювання (мкм).

Принципова відмінність пропонованого методу автоматичної реєстрації процесу вимірювання твердості полягає в тому, що переміщення індентора щодо поверхні зразка вимірюється одним датчиком, а сила опору впровадженню вимірюється іншим датчиком пропорційно відхиленню пружного елемента. У результаті випробування записується механічна реакція матеріалу у вигляді петлі гістерезису, зафіксованої в координатах навантаження- заглиблення (рис.2.7).

Схема діаграми вдавлювання представлена на рис. 2.7, на якій позначено наступні величини: h – максимальна глибина вдавлювання, h_c – контактна глибина, h_r – глибина відновленого відбитка, h_e – пружне відновлення відбитка, h_s – зміщення контактної поверхні при вдавлюванні, $2a$ – розмір відбитка на поверхні після навантаження, α та α_1 – кути між віссю та гранню при навантаженні і після зняття навантаження, відповідно [37].

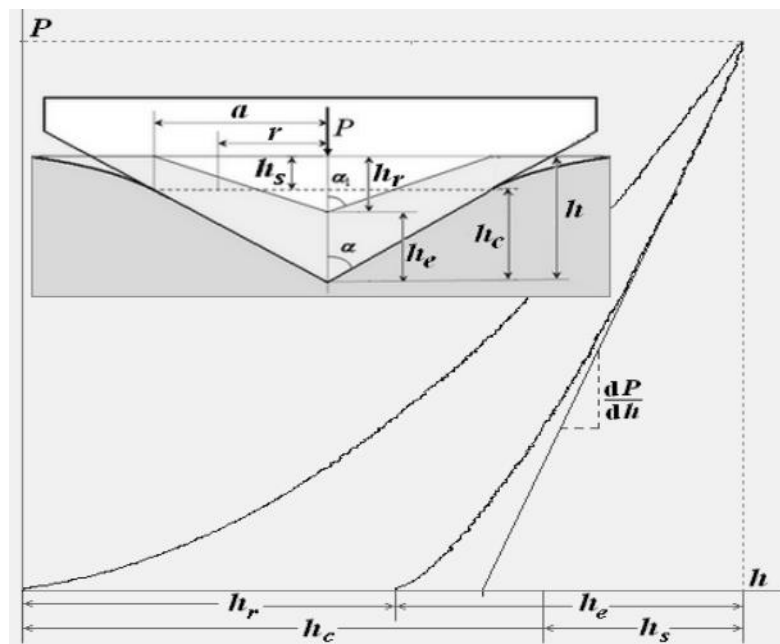


Рисунок 2.7 – Схематичне зображення діаграми вдавлювання [37,38]

Метод безперервного вдавлювання заснований на автоматичній реєстрації навантаження (P) на індентор і глибини його впровадження (h), для цього доцільно використовувати прилад “Micron-gamma” (рис. 2.8) [38].

Відновлювана деформація розраховується:

$$Re = ((h_{max} - h_p)/h_{max}) \cdot 100\%. \quad (2.4)$$



Рисунок 2.8 – Прилад “Micron-gamma” для дослідження фізико-механічних властивостей методами індентування

В табл. 2.4 наведені деякі характеристики приладу для вимірювання фізико-механічних властивостей методами індентування “Micron-gamma”.

Таблиця 2.4 – Характеристики приладу “Micron-gamma”

Діапазон задаваних навантажень, сН (г)	1 - 500
Вимірювана глибина впровадження, мкм	0,01 - 200
Швидкість навантаження, сН/с	0.01 - 100
Швидкість сканування, мкм/с	20 - 60

2.5 Висновки до розділу 2

Сплави на основі Cu-Mn-Al та Cu-Mn до яких додають до 3 % Fe є перспективними кандидатами на роль феромагнітних сплавів з пам'яттю форми. Властивості цих матеріалів напряму залежать від того, яке місце в структурі матеріалу буде займати Fe. Оскільки його кількість порівняно мала, то для дослідження цього питання був обраний метод електронного парамагнітного резонансу. Однією з вирішальних характеристик сплавів з пам'яттю форми, від якої залежить напрямок їх використання, є температурний інтервал прямого і оберненого мартенситного перетворення. Для визначення цього температурного інтервалу обґрунтовано обраний метод резистометрії, а для дослідження механічних характеристик – метод безперервного вдавлювання індентора.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Результати досліджень електронного парамагнітного резонансу

На рис. 3.1 представлені спектри ЕПР, виміряні у сплавах першої групи (Cu-Al-Mn-Fe). З симуляції спектрів для цих зразків випливає, що отримані спектри ЕПР (рис. 3.1) складаються з двох сигналів. Перший сигнал Лоренцевої форми, з шириною лінії 90 мТ та $g = 1,98$ можна віднести до уширеного секстету від іонів Mn^{2+} . Другий сигнал Гаусової форми шириною 40 мТ можна віднести до іонів Cu^{2+} з анізотропним g -тензором та середнім значенням $g_{av} = 2,37$. При збільшенні вмісту заліза до 2 % у низькопольовій частині спектрів ЕПР з'являється додаткова лінія Гаусової форми шириною 140 мТ з $g = 4,5$, яку можна віднести до ФМР.

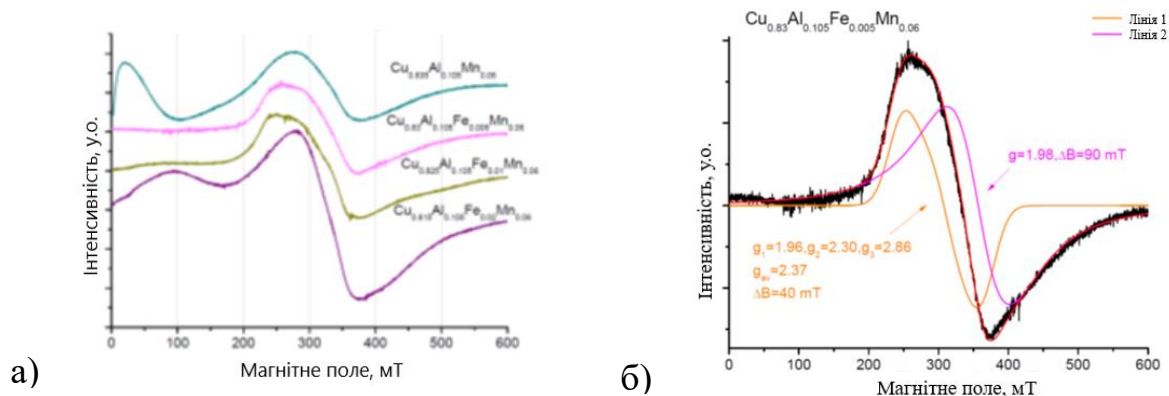


Рисунок 3.1 – Спектри ЕПР, виміряні у сплавах Cu-Al-Mn-Fe (а) та симуляція компонентів спектра ЕПР (б) (номери сплавів відповідно до табл. 2.1)

На рис. 3.2 представлені спектри ЕПР зразків сплавів Cu-Al-Mn-Fe в загартованому стані (без низькотемпературного старіння), при інших режимах запису спектрів. Наявність додаткового сигналу ФМР у низькопольовій частині спектра при магнітному полі порядку 100 мТ є свідченням присутності атомів заліза несферичної форми, характерної саме для складу з більшим вмістом заліза, як в загартованому, так і відпаленому стані. В загартованому стані сплави мають

більш нерівноважний стан і характеризуються більшою щільністю внутрішніх напружень, що в резонансних спектрах ЕПР та ЯМР виглядає як уширення основних ліній, на відміну від зістарених сплавів відпалених за температури 200 °С впродовж 3 годин. В результаті старіння в потрійних сплавах знімаються внутрішні напруження гартування та утворюються наночастинки фази за структурою Гейслера Cu_2AlMn , що змінює магнітне впорядкування з парамагнітного на суперпарамагнітний або феромагнітний стан.

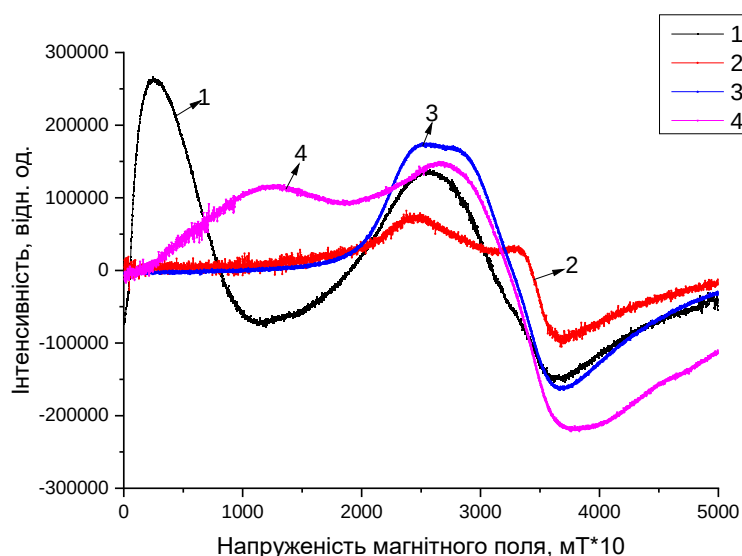


Рисунок 3.2 – Спектри ЕПР четверних сплавів Cu-Al-Mn-Fe з різним вмістом заліза в загартованому стані 1 (номери сплавів відповідно до табл. 2.1)

На рис. 3.3 представлені спектри ЕПР у сплавах Cu-Fe-Mn. Симуляція спектрів ЕПР показала, що у спектрах спостерігається широка лінія форми лінії Фойгта з шириною 156 мТ та $g \sim 2,2$ та вужча лінія Лоренцевої форми з шириною 40 мТ та $g \sim 2,06$. Інтенсивність спектрів ЕПР спадає при збільшенні вмісту заліза з 0,1 % до 0,3 % і надалі зростає при збільшенні вмісту заліза до 1 %. Лінію ЕПР з $g \sim 2,06$ можна віднести до іонів Fe^{3+} у октаедричному оточенні, а широку лінію до ФМР.

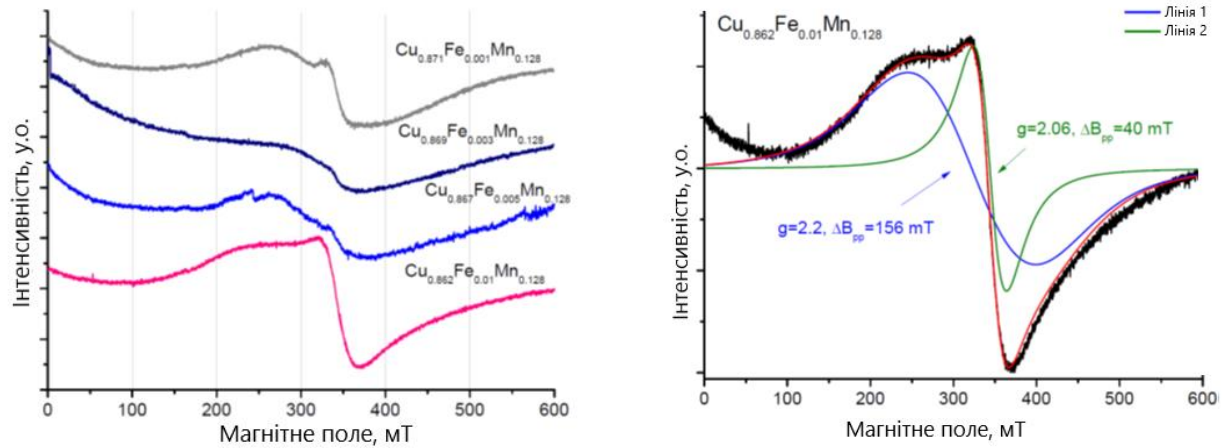


Рисунок 3.3 – Спектри ЕПР, виміряні у сплавах Cu-Fe-Mn (а) та симуляція компонентів спектра ЕПР, виміряного у зразку з номером 8 (б) (номери сплавів відповідно до табл. 2.2)

На рис. 3.4 представлено спектри для 3 групи зразків (Cu-Al-Mn). Асиметрична форма лінії Дайсона відповідає високій провідності у зразках через присутність електронів провідності.

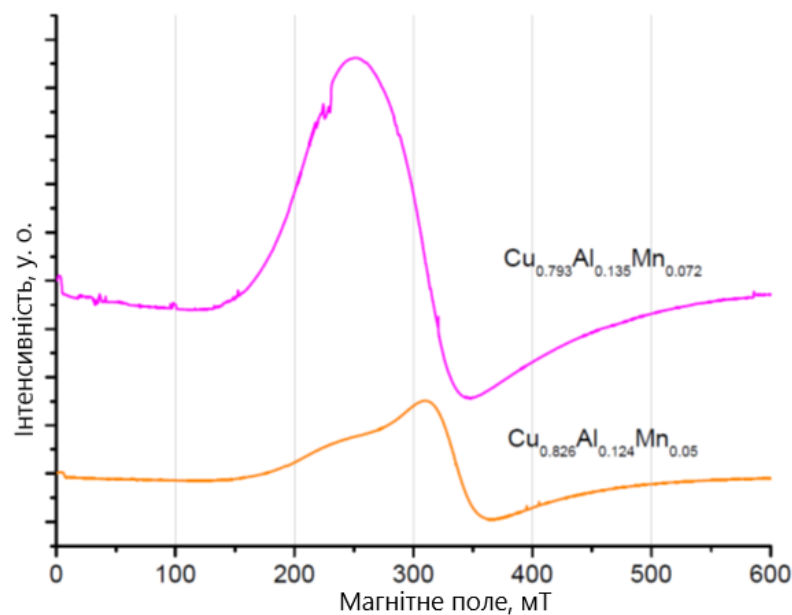


Рисунок 3.4 – Спектри ЕПР виміряні для сплавів номер 9 та 10. (номери сплавів відповідно до табл. 2.3)

3.2 Результати параметрів мартситного перетворення у СПФ з використанням методу резистометрії

За результатами вимірювання температурних залежностей електроопору сплавів першої групи (Cu-Al-Mn-Fe) були отриманні дані представлені в табл. 3.1. Як бачимо додавання 0,5 ат. % Fe призводить до зменшення характеристичних температур МП та розширення гістерезису (ΔT). Подальше додавання Fe до 1 ат. % та до 2 ат. % призводить до підвищення характеристичних температур МП та зменшенню гістерезису, який визначається як відстань між максимумами піків прямого і зворотного переходів.

Таблиця 3.1 – Характеристичні температури МП загартованих сплавів Cu-Al-Mn-Fe в залежності від концентрації заліза.

Номер сплаву	Fe, at%	M_s , °C	M_f , °C	A_s , °C	A_f , °C	ΔT , °C
1	0	-1,7	-21,1	41,4	57,3	57,9
2	0,5	-12,5	-36,2	33,2	55,7	59,5
3	1	4,4	-10,9	42,9	70,6	50,0
4	2	15,3	-3,0	53,3	66,2	44,2

Для зразків третьої групи (Cu-Al-Mn) були також проведенні дослідження впливу часу старіння на характеристичні температури МП. Результати цих досліджень (табл. 3.2) показують, що зі збільшенням часу старіння за температури 200 °C характеристичні температури збільшуються і зменшуються гістерезис. Що показує практичну можливість керування робочим діапазоном СПФ шляхом зміни технологічних параметрів їх отримання.

Таблиця 3.2 – Основні характеристичні температури МП у сплавi Cu-Al-Mn в залежності від часу старіння за температури 200 °С.

Час старіння, год	M_s , °C	M_f , °C	A_s , °C	A_f , °C	ΔT , °C
1	-97	-108	-76	-60	37
2	-76	-80	-51	-41	35
3	-70	-80	-51	-40	30
4	-51	-63	-50	-39	12
5	-46	-60	-48	-28	18

3.3 Результати визначення механічних властивостей четверних сплавів

На рис. 3.5 представлені діаграми вдавлювання для зразків номер 9 та 10, а також для порівняння, мідного зразка.

Відповідно до отриманих даних були розраховані показники відновлюваної деформації для зразків номер 9, 10 та чистою міді:

$$Re_9 = ((3,44 - 2,44)/3,44) * 100\% = 29\%,$$

$$Re_{10} = ((2,94 - 1,94)/2,94) * 100\% = 34\%,$$

$$Re_{Cu} = ((5,44 - 4,95)/5,44) * 100\% = 9\%.$$

Відносно невеликі показники відновлюваної деформації сплаву Cu-Al-Mn(Fe) пов'язані з наявністю двофазного стану (аустеніт+мартенсит), коли термодинамічна стійкість індукованого навантаженням МП під зовнішнім впливом зберігається при розвантаженні, на відміну від деформування фольг Cu-Al-Mn в повністю аустенітному стані. Накопичення структурних дефектів при циклюванню також сприяє покращенню демпфуючих характеристик.

В табл. 3.3 представлені механічні характеристики розраховані за діаграмами вдавлювання.

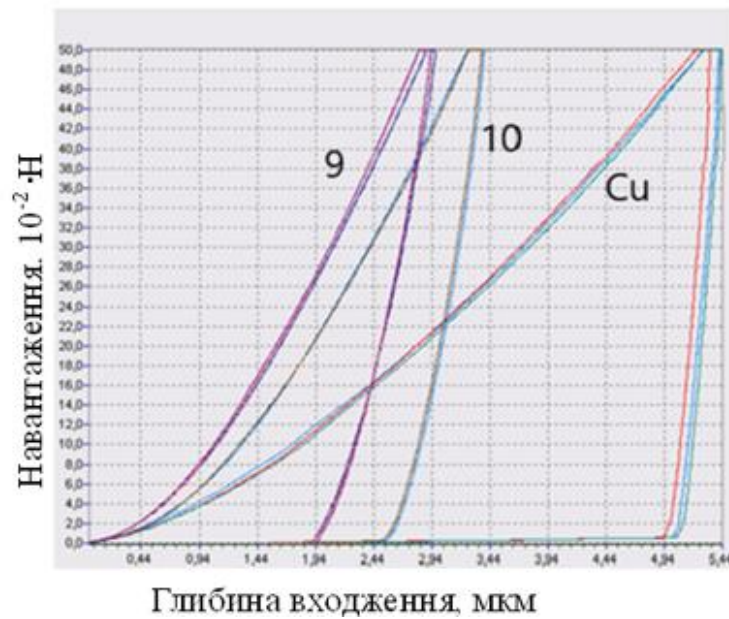


Рисунок 3.5 – Діаграми вдавлювання зразків номер 9 та 10 сплаву Cu-Al-Mn та для чистої міді

Таблиця 3.3 – Механічні характеристики за кімнатної температури досліджуваних сплавів з третьої групи та чистої міді.

Номер зразка	Твердість H , ГПа	Модуль Юнга E , ГПа
9	3,7	61
10	2,5	55
Чиста мідь	0,8	62

3.4 Висновки до розділу 3

Результати ЕПР сплавів на основі Cu-Al-Mn та Cu-Mn свідчать про складний характер магнітного впорядкування зі збільшенням концентрації Fe, який потребує додаткових досліджень. За даними резистометрії показано індукування в сплавах Cu-Al-Mn-Fe мартенситного перетворення. Встановлено, що зі збільшенням вмісту заліза відбувається немонотонне зростання температури початку мартенситного перетворення і зменшення гістерезису. Додавання заліза збільшує мікротвердість та відновлювальну деформацію в 3-4 рази, що підвищує ефективність ефекту пам'яті форми.

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність теми дослідження

Перспективним напрямком в матеріалознавстві є феромагнітні сплави з пам'яттю форми.. Завдяки своїй здатності, змінювати характеристики, під дією деформації, температури, магнітного та електричного полів, вони дають змогу обирати для конкретних завдань конкретні матеріали та режими обробки. Підвищується попит на дослідження таких матеріалів у світі, що є доказом перспективності використання та застосування. Вони є передовими матеріалами для дослідження та застосування у багатьох галузях таких, як: машинобудування, медицина, літакобудування, будівництво, аерокосмічна галузь

Для дослідження було обрано ФСПФ на основі міді, адже її ціна є низькою у порівнянні з іншими матеріалами. Також велику роль відіграє температурні межі застосування цих сплавів.

4.2 Розрахунок витрат та проведення НДР

Розрахунок витрат на проведення НДР розраховувалась у відповідності з наступними калькуляційними статтями витрат:

- 1) витрати на оплату праці;
- 2) визначення розміру єдиного соціального внеску;
- 3) витрати на матеріали необхідні для проведення досліджень;
- 4) витрати на спеціальне обладнання;
- 5) вартість послуг сторонніх організацій;
- 6) витрати на службові відрядження;
- 7) інші непрямі витрати;
- 8) накладні витрати;
- 9) калькуляції планової кошторисної вартості теми.

4.2.1 Витрати на оплату праці

Витрати на оплату праці розраховують на основі даних про трудомісткість окремих робіт по темі (табл. 4.1) та посадових окладів (табл. 4.2) безпосередніх їх виконавців. До виконання НДР було залучено трьох виконавців: старший науковий співробітник, інженер-дослідник, технік.

Таблиця 4.1 – Трудомісткість етапів виконання НДР

Етапи проведення НДР	Старший науковий співробітник	Інженер-дослідник	Технік
1. Опрацювання літературних джерел	7	15	-
2. Опанування методик дослідження	4	6	2
3. Підготовка дослідних зразків	2	2	2
4. Проведення резистометрії	-	2	2
5. Проведення індентометрії	-	1	1
6. Проведення електронного парамагнітного резонансу	-	2	2
7. Аналіз отриманих результатів та написання висновку	6	6	-
Разом	19	34	9

Таблиця 4.2 – Розрахунок витрат на оплату праці

Посада	Планова трудоємність, люд-днів	Посадовий місячний оклад	Середньоденна зарплата	Усього за виконавцями
Старший науковий співробітник	19	19658	927,26	17618,01
Інженер- дослідник	34	9250	436,32	14834,90
Технік	9	12530	14834,90	5319,34
Разом оплата праці з теми				37772,26

4.2.2. Визначення розміру єдиного соціального внеску

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) є обов'язковим відрахування на загальнодержавне соціальне страхування. Згідно законодавства з 1 січня 2016 р. ставка ЄСВ складає 22 % від заробітної плати:

$$\text{ЄСВ} = \text{ФЗП} \times 0,22 = 37772,26 \times 0,22 = 8309,90 \text{ грн}$$

4.2.3 Матеріали необхідні для проведення досліджень

Підрахування витрат на матеріали відбувалося виходячи із вартості та необхідної кількості матеріалів використаних в ході проведення досліджень. Дані про основні матеріали, їх ціну та кількість занесені до таблиці 4.3

Таблиця 4.3 – Розрахунки витрат на матеріали

Найменування матеріалу	Одиниці вимірювання	Кількість	Ринкова ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Мідь високої чистоти	кг	0,4	3900	1560
Манган високої чистоти	кг	0,05	5000	250
Алюміній високої чистоти	кг	0,05	200	10
Залізо високої чистоти	кг	0,002	500	1
Загальні витрати				1821,00

Транспортно-заготівельні витрати (T_v) приймаються на рівні 10 % від загальної вартості матеріалів:

$$T_v = 1821 \times 0,1 = 182,1 \text{ грн.}$$

Загальна сума витрат на матеріалів та їх транспортування (V_m) складає:

$$V_m = 1821 + 182,1 = 2003,10 \text{ грн.}$$

4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання

Всі дослідження до НДР проводилися з використанням обладнання, яке є в наявності в лабораторіях «Інститут металофізики імені Г. В. Курдюмова НАН України». Тому витрати на спеціальне обладнання відсутні.

4.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій

Сторонні організації не були задіяні в ході виконання НДР, тому затрати на їх послуги відсутні.

4.2.6 Визначення витрат на службові відрядження

Усі роботи з виконання НДР проводились в межах «Інститут металофізики імені Г. В. Курдюмова НАН України». Ніхто із виконавців роботи не був у відрядженні, тому витрати відсутні.

4.2.7 Інші прямі невраховані витрати по темі

В ході проведення роботи інші прямі витрати (I_v) приймаються за 10 % від врахованих при виконанні НДР:

$$I_v = (37772,26 + 8309,90 + 2003,10) \times 0,1 = 4808,53 \text{ грн.}$$

4.2.8 Накладні витрати

Накладні витрати – це витрати, які включають в себе: зарплати персоналу, який займається управлінням виконавцем теми, витрати на винахідництво і раціоналізацію; витрати на науково-технічну інформацію; витрати на забезпечення нормальних умов праці і охорону праці; витрати на оплату послуг банків; податки, збори та інші обов’язкові платежі і витрати тощо. Норматив відрахувань на накладні витрати (H_v) встановлений в 20 % від суми прямих витрат:

$$H_v = (37772,26 + 8309,90 + 2003,10 + 4808,53) \times 0,2 = 10578,76 \text{ грн.}$$

4.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Для формування планової калькуляції вартості досліджень за даною темою використовуються розрахунки та нормативні дані (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1.Витрати на оплату праці	37 772,26	Відповідно до розрахунків
2.Єдиний соціальний внесок	8 309,90	22,0 % від загальних витрат на оплату праці
3.Матеріали для проведення досліджень	2 003,10	Відповідно до розрахунків
4.Енергоносії для проведення досліджень	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
5.Спецобладнання для наукових цілей	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
6.Вартість послуг сторонніх організацій	—	За договором із сторонніми організаціями (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
7.Витрати на службові відрядження	—	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)
8.Інші невраховані прямі витрати по темі	4 808,53	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
9.Накладні витрати	10 578,75	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)
10.Усього витрат по темі	63 472,55	Сума попередніх статей

4.3 Науково-технічна ефективність НДР

Для визначення річного економічного ефекту скористаємося бальною системою оцінювання економічної ефективності за наступними показниками:

- важливість розробки (K_1);
- можливість використання результатів розробки (K_2);
- теоретичне значення та рівень новизни (K_3);
- складність дослідження (K_4).

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення:

- а) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- б) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- в) робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- г) робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- д) робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K_2 може приймати такі значення:

- а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- в) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів.
- г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;
- д) результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K_3 може приймати такі значення:

- а) робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;
- б) під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;
- в) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;
- г) внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо – 6 балів;

д) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт K_4 може приймати такі значення:

- а) роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;
- б) роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;
- в) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;
- г) робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;
- д) робота виконується декількома організаціями, витрати понад 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів:

$$Б = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4. \quad (4.1)$$

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 4.5 становить:

$$Б = 3 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 5 = 225.$$

Таблиця 4.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1. Важливість розробки	K_1	Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2. Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть бути використані декількома організаціями	5
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	3
4. Складність дослідження	K_4	Робота виконується декількома підрозділами, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	5

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot Б - E_n \cdot B_{\text{НДР}}, \quad (4.2)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1 – 0,3);

$B_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок табл. 4.4).

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 225 - 0,25 \cdot 63472,55 = 93458,24 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність НДР визначається коефіцієнтом умовної економічної ефективності E_e . Він є відношенням умовного ефекту виконання НДР до сумарних витрат на виконання НДР та розраховується за формулою:

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{B_{\text{НДР}}}. \quad (4.3)$$

У нашому прикладі E_e буде становити:

$$E_e = \frac{93458,24}{63472,55} = 1,472.$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 1,472 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

4.4 Висновки до розділу 4

1. В даному розділі була визначена планова кошторисна дипломної роботи, яка складає 63472,55 грн.

2. Підрахувавши коефіцієнт умовної економічної ефективності НДР для даної роботи отримали значення 1,472, яке є більшим за одиницю. Тому виконання дипломної роботи показує, що це дослідження є економічно доцільним.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – це важлива частина забезпечення виробничого процесу на підприємстві. Вона являє собою систему законодавчих актів, яким відповідають соціально-економічні, технічні, санітарно-гігієнічні та організаційні заходи, основним завданням яких є забезпечення захисту робітників від можливих небезпек, збереження їх здоров'я і працездатності в процесі трудової діяльності [39].

Метою даного розділу є дослідження небезпечних факторів, визначення потенційних загроз, а також способів їх попередження [40]. У цій роботі досліджувався вплив вмісту Fe на структуру та властивості СПФ на основі Cu-Al-Mn та Cu-Mn.

5.1 Аналіз параметрів приміщення

Науково–дослідницька робота виконувалась у інституті металофізики імені Г. В. Курдюмова НАН України, у центрі колективного користування резонансної спектроскопії. Схематичне зображення центру колективного користування, а також розташування всіх елементів наведено на рис 5.1. Табл. 5.1 містить характеристики приміщення, де розташоване обладнання.

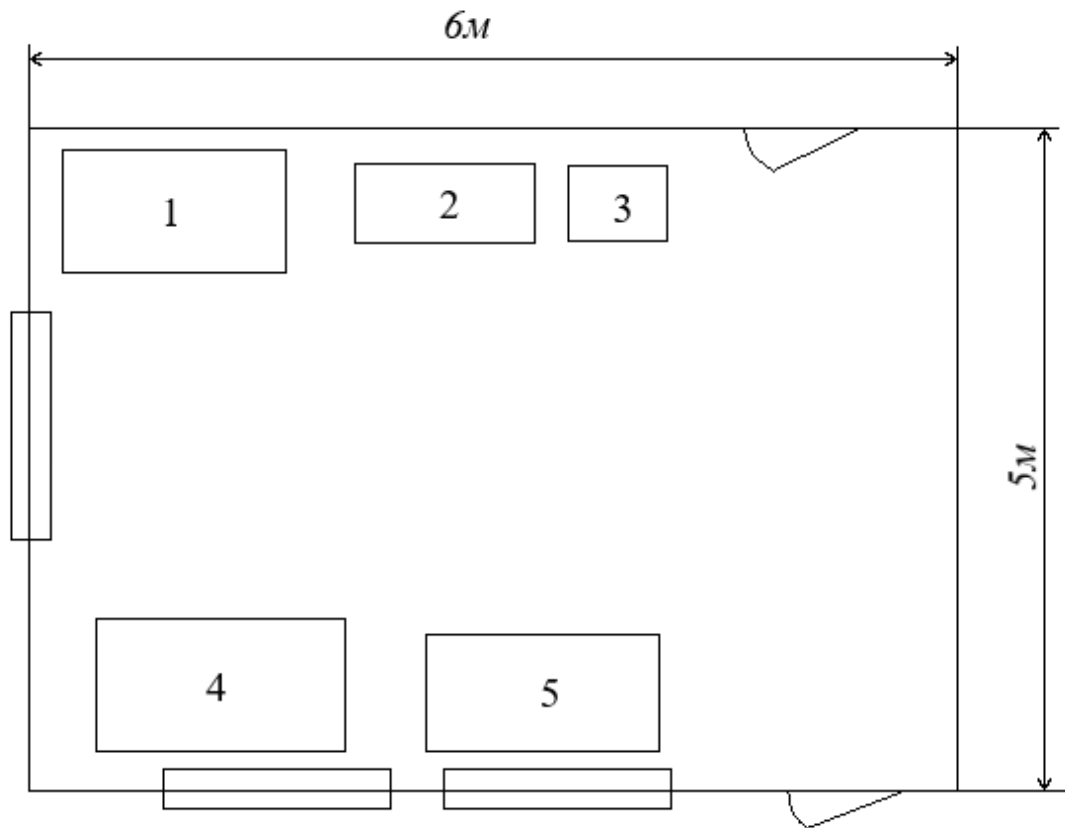
Площа аудиторії становить: $S=a \times b=6 \times 5=30 \text{ м}^2$.

Об'єм аудиторії становить: $V=a \times b \times c=6 \times 5 \times 4=120 \text{ м}^3$.

Кількість працюючих в аудиторії становило 2 особи.

Площа, яка приходить на одну людину – 15 м^2 , та об'єм – 60 м^3 .

Згідно з ДБН В.2.2-28-2010, де на одну людину повинно приходитись не менше 6 м^2 площі та 20 м^3 об'єму, дані відповідають нормам [40].



1 – робочий стіл з комп’ютером; 2 – ЕПР спектрометр Bruker ELEXIS-580; 3 – блок живлення спектрометра Bruker ELEXIS-580; 4 – чотирьохзондовий резистометр; 5 – мікротвердомір.

Рисунок 5.1 – Схема центру колективного використання

Таблица 5.1 – Параметры лаборатории

Параметр	Розмір, м
Параметри приміщення	
Довжина	6
Ширина	5
Висота	4
Параметри вікна	
Ширина	1,5
Висота	0,5

5.2 Аналіз шкідливих і небезпечних факторів

Аналіз ключових небезпечних і шкідливих виробничих факторів та розробка заходів щодо поліпшення умов праці є важливим етапом у системі управління охороною праці. Цей процес включає ідентифікацію, оцінку та управління ризиками, пов'язаними з впливом небезпечних і шкідливих факторів на здоров'я та безпеку працівників [39].

Оцінка небезпечних і шкідливих виробничих факторів включає аналіз умов праці, виробничого середовища та їх взаємодії з працівниками. Цей етап передбачає виявлення потенційних загроз та оцінку їхнього впливу на здоров'я працівників. Наприклад, це можуть бути такі фактори, як шум, вібрація, пил, хімічні речовини, спека, холод, висока інтенсивність праці та інші [40].

Після виявлення небезпечних і шкідливих факторів розробляються заходи щодо поліпшення або нормалізації умов праці. Ці заходи можуть бути технічними, організаційними або профілактичними, спрямованими на зменшення впливу небезпечних факторів або управління ризиками [39]. Наприклад, це можуть бути заходи щодо заміни шкідливих речовин більш безпечними аналогами, встановлення систем вентиляції, використання засобів індивідуального захисту, навчання працівників правилам безпеки тощо [41].

Необхідно постійно оновлювати та вдосконалювати оцінку небезпек і шкідливих факторів, а також розробляти нові заходи для поліпшення умов праці. Це допоможе створити безпечне і здорове робоче середовище для працівників та знизити ризик професійних захворювань і травматизму [40].

При виконанні даної роботи створюються наступні шкідливі та небезпечні фактори: шум, вібрації, недостатня освітленість та небезпека ураження електричним струмом.

5.2.1 Мікроклімат робочої зони

Якість повітря в робочій зоні має велике значення під час виконання будь-якої роботи, оскільки від неї залежить здоров'я працівників і їх продуктивність. Тому стан повітря в робочій зоні слід постійно контролювати та забезпечувати відповідність санітарним нормам мікроклімату виробничих приміщень згідно з ДСН 3.3.6.042-99 [41].

Для дослідження мікроклімату робочої зони необхідно виміряти такі параметри: температура повітря ($^{\circ}\text{C}$), відносна вологість повітря (%), швидкість руху повітря (м/с), та порівняти їх з оптимальними значеннями відповідно до пори року та категорії важкості роботи [42].

Роботу, що виконувалась у лабораторії, можна віднести до категорії важкості – II а. Ця категорія роботи пов'язана з ходінням та переміщенням невеликих предметів у положенні сидючи або стоячи, які вимагають незначного фізичного напруження. За таких фізичних навантажень енерговитрати організму людини становлять від 160 ккал/год до 210 ккал/год [42].

Таблиця 5.2 містить порівняння між нормативними параметрами мікроклімату та їх фактичними значеннями, отриманими під час вимірювань.

Таблиця 5.2 – Виміряні та нормовані параметри мікроклімату [42]

Категорія робіт середньої важкості IIа			
Період року	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	18-20	40-60	0,2
Виміряне значення	18	60	0,2
Теплий	21-23	40-60	0,3
Виміряне значення	22	45	0,2
Висновок	Відповідає вимогам	Відповідає вимогам	Відповідає вимогам

На основі даних вимірювання мікроклімату можна зробити висновок, що лабораторія відповідає рекомендованим стандартним нормам і забезпечує безпечні умови для проведення науково-дослідної роботи.

5.2.2 Аналіз освітленості приміщення

Належне освітлення робочої зони є ключовим фактором для забезпечення сприятливих умов праці, оскільки воно позитивно впливає на концентрацію та здоров'я працівників [39]. Освітлення може бути штучним, створеним за допомогою електричних джерел, або комбінованим, коли недостатнє природне освітлення доповнюється штучним [40].

У лабораторії використовується комбіноване освітлення, де природне світло доповнюється штучним. Природне бокове освітлення забезпечується через вікна, що виходять на північ, при цьому відстань від вікна до основної робочої зони становить, не більше 1,5 метри. Для загального штучного освітлення використовуються 10 люмінесцентних ламп ЛБ-40. Оскільки розмір деяких зразків не перевищує кількох міліметрів, роботу, що виконується в лабораторії, можна віднести до роботи високої точності.

Недостатнє або надмірне освітлення, а також його нерівномірність, призводять до втоми очей, зниження продуктивності працівників, можуть викликати головний біль та порушення зору [39].

5.2.3 Аналіз шуму, вібрації, інфра- та ультразвуку

Робота ЕПР спектрометра Bruker ELEXIS-580 викликає виникнення шуму. Також, робота різних компонентів комп'ютера, таких як жорсткий диск, вентилятори блоку живлення, охолодження процесора спричиняє виникнення шуму. Крім того, наявність інших зовнішніх джерел шуму, які не пов'язані з роботою установки або комп'ютера, також може впливати на загальний рівень шуму.

Під час роботи було виміряно, що рівень шуму не перевищує допустимий рівень. Значення отримані в приміщенні лабораторії не перевищують 65 дБА [41].

Інфразвук може виникати внаслідок шуму, створюваного рухомими елементами обладнання з частотою менше 20 Гц. Ультразвук є додатковим фактором, що з'являється під час роботи технологічного та вентиляційного обладнання. Шумове обладнання, таке як аналого-цифрові перетворювачі, принтери, сканери та інше, повинно бути розташоване окремо від приміщень, де виконується робота [39].

5.3 Безпека при роботі з електричними приладами

Електробезпека - це комплекс заходів, спрямованих на захист працівників від небезпек, пов'язаних з електричним струмом. Ураження електричним струмом може статися через підключення до мережі неізольованих проводів або незаземленого обладнання. Електричний струм може викликати пошкодження нервової системи та м'яких тканин організму, що може призвести до летальних наслідків. Основне завдання електробезпеки – запобігати або мінімізувати негативний вплив електричного струму на людину [43].

На електричне ураження впливають такі фактори: сила струму (1 мА), тип струму (перемінний), частота струму (50 Гц), тривалість впливу струму, стан організму людини та виробниче середовище [40].

Категорія приміщення визначається наявністю в ньому факторів, що можуть спричинити електротравми [43]. До таких факторів належать:

- температура в приміщенні вище 35 °С;
- відносна вологість понад 75 %;
- струмопровідна підлога — металева, бетонна, цегляна;
- можливість одночасного дотику до неструмопровідних частин приладів або струмопровідних конструкцій.

У лабораторії комп'ютери, які використовуються для обробки результатів експериментів, а також ЕПР спектрометр Bruker ELEXIS-580, становлять

потенційну загрозу ураження електричним струмом. Лабораторія є зоною високого ризику через можливий одночасний контакт із заземленими металевими частинами будівельної конструкції та задньою частиною пристрою. На вході в лабораторію встановлено розподільний щиток для відключення електроенергії у разі аварії.

5.4 Пожежна безпека

Категорія приміщень і будівель за вибухопожежною та пожежною небезпекою визначає вимоги до конструктивних і планувальних рішень промислових об'єктів. Ці вимоги враховують показники пожежовибухонебезпечності речовин і матеріалів, що знаходяться або використовуються в приміщенні. Відповідно до стандарту [44], приміщення поділяються на п'ять категорій (А, Б, В, Г, Д).

Залежно від категорії, лабораторії можуть бути віднесені до різних категорій вибухопожежної небезпеки. Наприклад, до категорії Д відносяться лабораторії для приготування порошкових сумішей та проведення досліджень з негорючими матеріалами, такими як порошки cBN. Категорія В може включати лабораторії з апаратами високого тиску, вакуумними печами та дробарками, де присутні негорючі порошки в розжареному стані і може виділятися горючий газ, наприклад, водень [39].

У приміщеннях, де розміщені лабораторії, необхідна наявність системи пожежної сигналізації [44]. Ця система складається з технічних засобів, призначених для виявлення пожежі, передачі повідомлення про неї та подачі команд на включення автоматичних установок пожежогасіння і систем проти димного захисту. Пожежні сигналізаційні системи можуть бути променевими або кільцевими, залежно від схеми підключення сповіщувачів [39].

У систем сповіщення застосовуються різні типи сповіщувачів, що реагують на дим, тепло та світло. Чутливі елементи сповіщувачів можуть бути виготовлені з біметалів, термопар, напівпровідників та інших матеріалів [44].

Таким чином, вимоги щодо пожежної та вибухобезпеки лабораторій значною мірою визначаються їхньою категорією вибухопожежної та пожежної небезпеки і враховуються при проектуванні та обладнанні цих приміщень [44].

У Інститут металофізики імені Г. В. Курдюмова НАН України значна частина обладнання працює на електриці, для цього основним засобом гасіння пожежі є вогнегасники типу ОУ-2. Для виявлення пожеж у приміщеннях використовується автоматична пожежна сигналізація, яка включає плавкові датчики. Ці датчики активуються при підвищенні температури, що спричиняє плавлення їхніх елементів, і спрацьовують, сповіщаючи про виникнення пожежі.

При виникненні пожежі всі працівники повинні евакуюватися із приміщення шляхом, вказаним на плані евакуації (рис. 5.2).

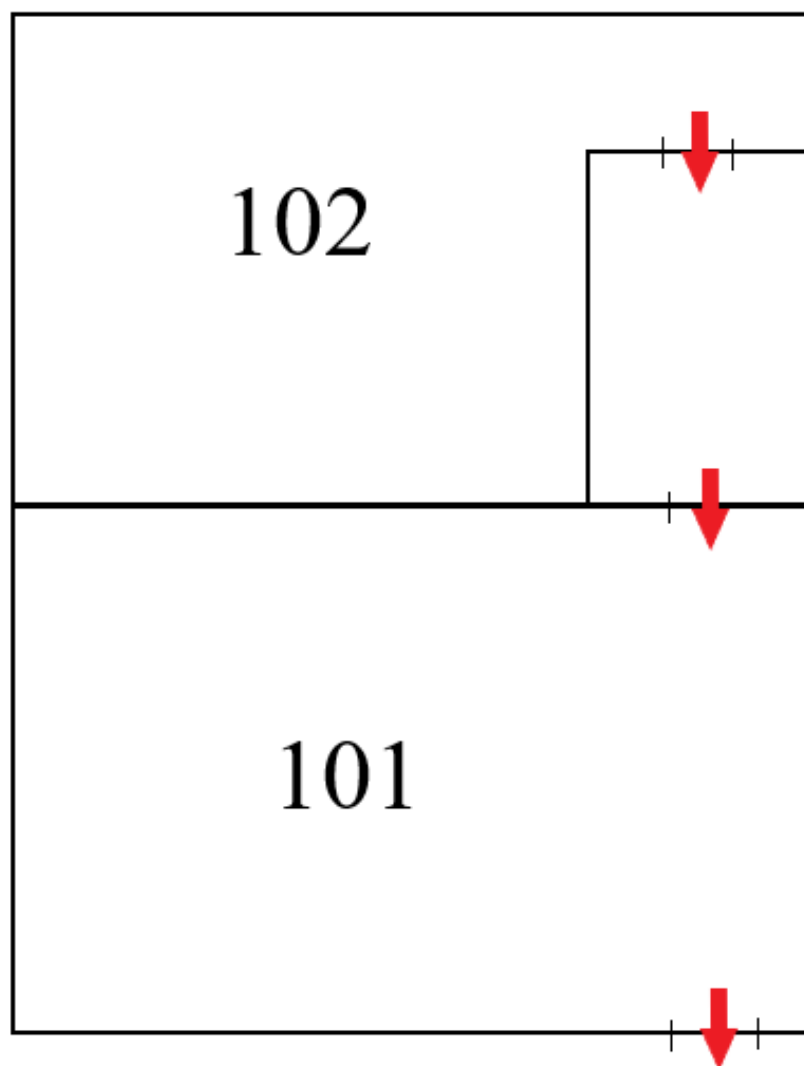


Рисунок 5.2 – План евакуації із приміщення лабораторії

5.5 Алгоритм дій у випадку "Повітряної тривоги" за сигналом цивільного захисту

Згідно з наказом від 04.08.2022 № НУ/129/2022, сигнал "Повітряна тривога" поширюється через централізовану систему оповіщення (сирени), регіональне радіо та телебачення. Сирени звучать від трьох до п'яти хвилин, попереджаючи про можливу загрозу ракетних або авіаційних ударів і закликаючи негайно перейти до найближчого укриття.

Працівники повинні знати завдання цивільного захисту, місцезнаходження найближчих укриттів або захисних споруд і порядок дій у разі сигналу "Повітряна тривога". Під час сигналу необхідно виконувати розпорядження керівництва та переміщатися до найближчого укриття, а саме станція метро "Академмістечко". Якщо це неможливо, слід обрати найбільш захищене місце в приміщенні, подалі від вікон і зовнішніх стін, і залишатися там до закінчення тривоги. Після закінчення сигналу працівники можуть повернутися на робочі місця або діяти відповідно до додаткових вказівок керівництва чи органів цивільного захисту.

Отже, під час сигналу "Повітряна тривога" працівники повинні оперативно виконувати розпорядження керівництва, пересуватися до найближчих укриттів або захисних споруд, дотримуючись інструкцій щодо безпеки, щоб забезпечити особисту безпеку та мінімізувати ризики в надзвичайних ситуаціях.

5.6 Висновки до розділу 5

Проаналізувавши умови праці, сукупність небезпечних та шкідливих факторів було визначено, що центр колективного користування резонансної спектроскопії відповідає нормам для дослідницької роботи в ньому. Було засвоєно дії по плану евакуації з приміщення, з урахуванням оголошення сигналу цивільного захисту "Повітряна тривога".

ВИСНОВКИ

1 В рамках роботи проведений системний аналіз функціональних можливостей використання сплавів з ефектом пам'яті форми. Показані умови та особливості за якими в сплавах типу Гейслера на основі Cu-Mn та Cu-Mn-Al протікають мартенситні перетворення і трансформації. Наведені дані свідчать про практичний потенціал для вдосконалення цих систем і покращення їх характеристик.

2 Сплави на основі Cu-Mn-Al та Cu-Mn до яких додають до 3 % Fe є перспективними кандидатами на роль феромагнітних сплавів з пам'яттю форми. Властивості цих матеріалів напряму залежать від того яке місце в структурі матеріалу буде займати Fe. Оскільки його кількість порівняно мала, то для дослідження цього питання був обраний метод електронного парамагнітного резонансу. Однією з вирішальних характеристик сплавів з пам'яттю форми, від якої залежить напрямок їх використання, є температурний інтервал прямого і оберненого мартенситного перетворення. Для визначення цього температурного інтервалу обґрунтовано обраний метод резистометрії, а для дослідження механічних характеристик – метод безперервного вдавлювання індентора.

3 Результати ЕПР сплавів на основі Cu-Al-Mn та Cu-Mn свідчать про складний характер магнітного впорядкування зі збільшенням концентрації Fe, який потребує додаткових досліджень.

4 За даними резистометрії показано індукування в сплавах Cu-Al-Mn-Fe мартенситного перетворення. Встановлено, що зі збільшенням вмісту заліза відбувається немонотонне зростання температури початку мартенситного перетворення і зменшення гістерезису. Визначені механічні характеристики деяких сплавів за діаграмами вдавлювання.

5 Практично доведено, що варіювання кількості Fe у СПФ на основі Cu-Al-Mn та Cu-Mn дозволяє керувати характеристичними температурами мартенситного перетворення (і відповідно встановлювати необхідні робочі температури їх використання), а також впливає на магнітні характеристики цих сплавів, що дозволяє значно розширити область їх використання.

6 Була визначена планова кошторисна вартість дипломної роботи, яка складає 63472,55 грн. Коефіцієнт умовної економічної ефективності даної НДР є більшим за одиницю, тому виконання даної дипломної роботи є економічно доцільним.

7 Проаналізувавши сукупність небезпечних та шкідливих факторів було визначено, що центр колективного користування резонансної спектроскопії відповідає нормам для дослідницької роботи в ньому. Було засвоєно дії по плану евакуації з приміщення, з урахуванням оголошення сигналу цивільного захисту “Повітряна тривога”.

CONCLUSIONS

1 A systematic analysis of the functional capabilities of using alloys with the shape memory effect was carried out as part of this work. The conditions and features under which martensitic transformations and transformations occur in Cu-Mn and Cu-Mn-Al-based Heisler alloys are shown. These data indicate the practical potential for improving these systems and improving their characteristics.

2 Alloys based on Cu-Mn-Al and Cu-Mn with up to 3 % Fe are promising candidates for the role of ferromagnetic alloys with shape memory. The properties of these materials directly depend on the place of Fe in the material structure. Since its amount is relatively small, the method of electron paramagnetic resonance was chosen to study this issue. One of the decisive characteristics of shape memory alloys, which determines the direction of their use, is the temperature interval of direct and reverse martensitic transformation. To determine this temperature interval, the resistometry method was justified, and to study the mechanical characteristics, the method of continuous indentation was chosen.

3 The EPR results of Cu-Al-Mn and Cu-Mn-based alloys indicate a complex nature of magnetic ordering with increasing Fe concentration, which requires additional research.

4 The resistometry data show the induction of martensitic transformation in Cu-Al-Mn-Fe alloys. It was found that with an increase in the iron content, there is a non-monotonic increase in the temperature of the onset of martensitic transformation and a decrease in hysteresis. The mechanical characteristics of some alloys were determined by indentation diagrams.

5 It has been practically proven that varying the amount of Fe in Cu-Al-Mn and Cu-Mn-based alloys allows controlling the characteristic temperatures of martensitic transformation (and, accordingly, setting the required operating temperatures for their use), and also affects the magnetic characteristics of these alloys, which can significantly expand the scope of their use.

6 The planned estimated cost of the thesis was determined to be UAH 63472.55. The coefficient of conditional economic efficiency of this research work is greater than one, so the implementation of this thesis is economically feasible.

7 Analyzing the set of hazardous and harmful factors, it was determined that the resonance spectroscopy community center meets the standards for research work in it. Actions were taken according to the evacuation plan, taking into account the announcement of the civil defense signal “Air Alert”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pecora R. SMA for aeronautics / R. Pecora // Shape Memory Alloy Engineering. – Elsevier. – 2021. – P. 527–559.
2. Riccio A. Shape memory alloys (SMA) for automotive applications and challenges / A. Riccio // Shape Memory Alloy Engineering. – Elsevier. – 2021. – P. 785–808.
3. Wei Z.G. Review Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems Part I Shape-memory materials / Z. G. Wei, R. Sandström // Journal of Materials Science. – 1998. – 33. – P. 3743–3762.
4. Jani J. M. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities / J. M. Jani, M. Leary, A. Subic, M. A. Gibson // Materials and Design. – №56. – P. 1078–1113.
5. Коваль Ю.М. Сплави з ефектом пам'яті форми – потужний клас функціональних матеріалів / Ю. М. Коваль // Наука та інновації. – 2005. – Т. 1, № 2. – С. – 95.
6. Acet M. Magnetic-Field-Induced Effects in Martensitic Heusler-Based Magnetic Shape Memory Alloys / M. Acet, L. Manosa, A. Planes // Handbook of Magnetic Materials. – 2011. – V.19. – P. 231–289.
7. Фірстов Г. С. Функціональні матеріали з пам'яттю форми: сучасний стан і перспективи використання (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 21 березня 2018 року) / Г. С. Фірстов // Вісник Національної академії наук України. – 2018. – № 6. – С. 19–34.
8. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди / [под ред. С. В. Шухардина] // Наука. – 1979. – 415 с.
9. Tadaki T. Shape memory materials / T. Tadaki, K. Otsuka, C. M. Wayman // Cambridge University Press. – 1998. – P. 97–116.
10. Otsuka K. Recent developments in the research of shape memory alloys / K. Otsuka, X. B. Ren // Intermetallics. – 1999. – №7. – P. 511–528.

11. Excellent shape recovery characteristics of Cu-Al-Mn-Fe shape memory single crystal / S. Yang, L. Guo, X. Qing, S. Hong, J. Zhang, Li Mingpei, C. Wang, X. Liu // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2020. – № 57. – P. 43–50.
12. Dynamic Recovery and Superelasticity of Columnar-Grained Cu–Al–Mn Shape Memory Alloy / S. Xu, H. Huang, J. Xie, Y. Kimura, X. Xu, T. Omori, R. Kainuma // *Metals*. – 2017. – №7. – P. 141.
13. Role of $\beta(\text{FeAl})$ nanoparticles in abnormal grain growth in the annealing of cast Cu-Al-Mn-Fe shape memory alloys / S. Yang, X. Qing, J. Zhang, L. Guo, S. Hong, M. Li, // *Prog. Nat. Sci.: Mater. Int.* – 2020. – № 30. – P. 510–516.
14. Alshits V.I. Magnetoplastic effect: Basic properties and physical mechanisms / V. I. Alshits, E. V. Darinskaya, M. V. Koldaeva // *Crystallogr. Rep.* – 2003. – №48. – P. 768–795.
15. Graf T. Simple rules for the understanding of Heusler compounds / T. Graf, C. Felser, D. Stuart, S. P. Parkin. // *Progress in Solid State Chemistry*. – 2011. – Volume 39.– P. 1–50.
16. Heusler O. Kristallstruktur und Ferromagnetismus der Mangan-Aluminium Kupferlegierungen / O. Heusler // *Annalen der Physik*. – 1934. – 411. – P. 155.
17. Brooks J.S. Magnetic Hyperfine Interactions in the Ferromagnetic Heusler-Type Alloy Co_2TiSn Studied by Means of the Mössbauer Effect in ^{119}Sn / J. S. Brooks, J. M. Williams, // *phys. stat.* – 1975. – sol. (a), 32. – P. 413–417.
18. New Class of Materials: Half-Metallic Ferromagnets / R. A. D. Groot, F. M. Mueller, P. G. V. Engen, K. H. J. Buschow // *Physical Review Letters*. – 1983. – V. 50, Is. 25. – P. 2024–2027.
19. Formation and coupling of magnetic moments in Heusler alloys / J. Kübler, A. R. Williams, C. B. Sommers // *Physical Review B*. – 1983. – P. 1745–1755.
20. Kandpal H. Published Calculated electronic and magnetic properties of the half-metallic, transition metal based Heusler compounds *Materials Science* / H. Kandpal, G. Fecher, C. Felser // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2006. – P. 40.

21. Atomic and magnetic order in the weak ferromagnet CoVSb: is it a half-metallic ferromagnet? / L. Heyne, T. Igarashi, T. Kanomata, K.-U. Neumann, B. Ouladdiaf, K. R. A. Ziebeck // *J Phys Condens Matter*. – 2005. – P. 17

22. Методи магнітного резонансу частина 1. Основи. Режим доступу: <https://chem.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2016/11/lecture-12.pdf>. – Дата доступу: 18.05.2024.

23. ^{27}Al , ^{63}Cu NMR spectroscopy and electrical transport in Heusler Cu–Mn–Al alloy powders / V. M. Nadutov, A. O. Perekos, V. V. Kokorin, V. V. Trachevskii, S. M. Konoplyuk, D. L. Vashchuk // *Applied Nanoscience*. – Volume 8, Issue 5. – P. 965–971.

24. Такзей Г.А. Возникновение дальнего ферромагнитного порядка в системе ферромагнитных частиц с гигантскими магнитными моментами / Г. А. Такзей, И. Мирабо, Л. П. Гунько // *ЖСТФ*. – 1998. – т.114, вып. 5(11). – С. 1848–1858.

25. Anomalous Giant Magnetoresistance in Heusler-Type Alloys $\text{Fe}_{2+x}\text{V}_{1-x}\text{Ga}$ / K. Endo, H. Matsuda, K. Ooiwa, M. Iijima, K. Ito, T. Goto, // *The Physical Society of Japan*. – 1997. – №66. – P. 1257–1260.

26. Chen J. Elastocaloric cooling of shape memory alloys: A review / J. Chen, L. Lei, G. Fang // *Materials Today Communications*. – 2021. – Vol. 28. – P. 102.

27. Boyce B. Conduction-electron spin density around Fe impurities in Cu above and below the Kondo temperature / B. Boyce, C. P. Slichter // *Physical Review B*. – 1976. 13,1. – P. 379.

28. Товстолиткін О.І Фізичні основи спітроніки: навчальний посібник / О. І. Товстолиткін, М. О. Боровий, В. В. Курилюк, Ю. А. Куницький // ТОВ «Нілан-ЛТД». – Вінниця. – 2014. – 500 с.

29. Поплавко Ю.М. Основы физики магнитных явлений в кристаллах: учебное пособие / Ю. М. Поплавко // НТУУ «КПИ». – Киев. – 2004. – 227с.

30. Duin E. Electron Paramagnetic Resonance Theory. Режим доступу: https://webhome.auburn.edu/~duinedu/epr/1_theory.pdf. – Дата доступу: 10.05.2024

31. Основи метрології та вимірювальної техніки [Текст] : навчальний посібник / В. О. Поджаренко, П. І. Кулаков, О. Г. Ігнатенко, О. П. Войтович. – Вінниця : ВНТУ. – 2006. – 151 с.

32. Вимірювання опору за допомогою моста постійного струму. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/2424980/>. – дата доступу: 15.05.2024.

33. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології», спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М. В. Бик, О. І. Букет, Г. С. Васильєв. – Електронні текстові дані (1 файл: 7,96 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 318 с. – Назва з екрана.

34. Перекос А.О. Мартенситне перетворення при формуванні системи наночастинок у стопі Cu–Al–Mn після відпалу в магнітному полі / А. М. Тітенко, А. О. Перекос, Л. Д. Демченко // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології: Зб. наук. пр. – К.: РВВ ІМФ. – 2014. – Т. 12, № 1. – С. 123-132.

35. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов: Учебное пособие для профессионально-технических училищ / П. П. Костин– М.:Машиностроение. – 1990. – 256 с.

36. Oliver W.C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of Materials Research. – 1992. – V. 7. – P. 1564–1583.

37. Зміцнення поверхневих шарів латуні ЛС59-1 за умов витримки та високочастотної ударної деформації у рідкому азоті / М. О. Васильєв, Б. М. Мордюк, С. І. Сидоренко, С. М. Волошко, А. П. Бурмак, Д. В. Пефті // Металофізика і новітні технології. – 2019. – Т. 41, № 12. – С. 1499–1517

38. Булычев С.И. Об определении физико-механических свойств материалов методом непрерывного вдавливания индентора / С. И. Булычев, В. П. Алехин, А. П. Терновский // Физика и химия обработанных материалов. – 1996. – №2. – 64 с.

39. Желібо Є.П. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів освіти України I-IV рівнів акредитації/ Є. П. Желібо, Н. М. Заверуха, В. В. Зацарний // Київ: «Каравела». – 2001. – 320 с.

40. Левченко О.Г. Охорона праці та цивільний захист [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / О. Г. Левченко // КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 26,1 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 472 с.

41. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – [Чинний від 1999-12-01]. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. – 34 с.

42. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – [Чинний від 1999-12-01]. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. – 10 с.

43. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – [Чинний від 1998-02-10]. – Київ : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 93 с.

44. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 – Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – [Чинний від 2017-01-01]. – Київ : Національний стандарт України, 2016. – 34 с