

**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
« ___ » _____ 2022 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Металофізичні процеси та їх
комп'ютерне моделювання»**

спеціальності 132 «Матеріалознавство»

**на тему: «Вплив термічної обробки на структуру і властивості сплавів з
пам'яттю форми на основі міді»**

Виконав:

студент ІV курсу, групи ФМ-81
Биканов Тимур Віталійович _____

Керівник:

к.т.н. доцент Демченко Леся Дмитрівна _____

Консультанти

з питань нормоконтролю Шаповалова Н. А. _____

з наукової частини к.ф-м.н., с.н.с., Тітенко А. М. _____

з економічних питань к.е.н., доцент Нараєвський С.В. _____

з питань охорони праці д.т.н., професор Левченко О.Г. _____

Рецензент

д.т.н. доцент Мініцький А.В. _____

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

Студент _____

Київ – 2022 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 «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

«__» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Биканову Тимуру Віталійовичу

1. Тема роботи «Вплив термічної обробки на структуру і властивості сплавів з пам'яттю форми на основі міді», керівник роботи Демченко Леся Дмитрівна, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «09» червня 2022 р. № 992-с

2. Термін подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи літературні дані, дані з преддипломної практики.

4. Зміст роботи

1) Основна частина

Дослідити вплив різних режимів термічної обробки на структуру та властивості сплавів з пам'яттю форми на основі Cu-Al-Mn в залежності від хімічного складу зразків. Дослідити мікроструктуру та визначити мікротвердість зразків сплавів на основі Cu-Al-Mn. Зробити висновки по отриманим експериментальним даним.

2) Економічна частина

Розрахувати кошторису собівартість проведення дослідження виходячи із всіх статей витрат. Визначити економічну ефективність та доцільність проведення науково-дослідної роботи.

3) Охорона праці

Проаналізувати параметри мікроклімату та відповідність організації робочого місця всім необхідним вимогам. Визначити тип і рівень освітлення в приміщенні, де проводиться НДР. Визначити рівень шуму на предмет безпечності для людини.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)
Тема роботи (1 слайд); актуальність теми (1 слайд); мета і завдання роботи (2 слайди); матеріали та методика досліджень (4 слайди); результати (5 слайдів); висновки (2 слайди), апробація (1 слайд).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічна частина	к.е.н., доцент Нараєвський С.В.		
Охорона праці	д.т.н., професор Левченко О.Г.		
3 питань нормоконтролю	Шаповалова Н. А.		
3 наукової частини	к.ф-м.н., с.н.с., Тітенко А. М.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання	15.02.2022	
2	Огляд літературних джерел до теми роботи та написання літературного огляду	14.04.2022 – 30.04.2022	
3	Ознайомлення з методиками досліджень	02.05.2022 – 06.05.2022	
4	Проведення експериментальних досліджень	09.05.2015 – 20.05.2022	
5	Отримання та обробка результатів досліджень	23.05.2022 – 26.05.2022	
6	Написання висновків	27.05.2022 – 29.05.2022	
7	Оформлення роботи	01.06.2022 – 06.06.2022	
8	Створення презентації та написання доповіді до захисту дипломної роботи	07.06.2022 – 14.06.2022	
9	Захист дипломної роботи на засіданні ДЕК	23.06.2022	

Студент

Тимур БИКАНОВ

Керівник

Леся ДЕМЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 69 сторінок, 24 рисунки, 10 таблиць, 60 літературних джерел.

β-ФАЗА, ВІДПАЛ, ЗАГАРТУВАННЯ, МАРТЕНСИТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ, НАДПРУЖНІСТЬ, ПАМ'ЯТЬ ФОРМИ, СПЛАВИ Cu-Al-Mn, ФЕРОМАГНІТНА ФАЗА.

Об'єкт дослідження: сплави з пам'яттю форми на основі Cu-Al-Mn.

Мета роботи: дослідження впливу термічної обробки та легування на структуру, властивості та фазовий склад сплавів з пам'яттю форми на основі міді.

Методи дослідження: проведення флуоресцентного рентгеноспектрального, металографічного, мікродюрOMETричного та рентгенофазового аналізів.

Результати досліджень: 1. Хімічний склад та термічна обробка впливають на структуру, фазовий склад, властивості та температуру протікання МП. Легування 1 % Fe призводить до підвищення температури протікання МП. Також легування сприяє росту зерна, завдяки чому сплав отримує кращі показники пам'яті форми.

2. Відпал сприяє виділенню феромагнітної β_3 -фази Cu_2AlMn при старінні пересиченого твердого розчину Al і Mn в Cu. Низька інтенсивність рефлексів і сильне розмиття дифракційних піків свідчить про нанодисперсність β_3 -фази. Мікротвердість відпалених сплавів нижча, ніж загартованих, це пов'язано з режимом термічної обробки і з концентрацією легуючих елементів.

Практичне значення: Результати, отримані в ході проведення досліджень мають практичне значення у використанні сплавів з пам'яттю форми для розробки та виготовлення нових перспективних матеріалів. З економічної точки зору виконання даної науково-дослідної роботи є доцільним.

ABSTRACT

Attestation bachelor work: 69 pages, 24 figures, 10 tables, 60 literature sources

ANNEALING, β -PHASE, COPPER ALLOYS, FERROMAGNETIC, HARDENING, MARTENSITIC TRANSFORMATION, SHAPE MEMORY, SUPERELASTICITY.

Object of research: shape memory alloys based on Cu-Al-Mn.

Purpose of the study: to research the effect of heat treatment and alloying on the structure, properties and phase composition of shape memory alloys based on copper.

Research methods: conducting fluorescent X-ray spectral, metallographic, microdiurometric and X-ray phase analyzes.

Research results: 1. Chemical composition and heat treatment affect the structure, phase composition, properties and flow temperature of MT. Doping with 1% Fe leads to increase temperature of MT. Alloying also promotes grain growth, giving the alloy better shape memory.

2. Annealing promotes the release of ferromagnetic β_3 -phase Cu_2AlMn during aging of supersaturated solid solution of Al and Mn in Cu. Low intensity of reflexes and strong blurring of diffraction peaks indicate nanodispersity of β_3 -phase. The microhardness of annealed alloys is lower than that of hardened alloys, which is due to the heat treatment regime and the concentration of alloying elements.

Practical application: The results obtained during the research have practical importance of using the shape memory alloys for the development and manufacture of new promising materials. From an economic point of view, the implementation of this research work is appropriate.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	10
1.1 Актуальність теми дослідження.....	10
1.2 Структура, властивості, мартенситні перетворення в сплавах на основі Cu.....	18
1.2.1 Фази в системі Cu-Al-Mn та діаграми фазової рівноваги.....	20
1.2.2 Ефект пам'яті форми, надпружність, перспективність застосування сплавів з пам'яттю форми на основі Cu.....	22
1.3 Структура, властивості, мартенситні перетворення в сплавах на основі Fe.....	25
1.3.1 Фази в системі Fe-Co-Ni та діаграми фазової рівноваги.....	26
1.3.2 Ефект пам'яті форми, надпружність, перспективність застосування сплавів з пам'яттю форми на основі Fe.....	28
1.4 Висновки до розділу 1.....	31
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	32
2.1 Матеріали дослідження.....	32
2.2 Методика дослідження.....	32
2.2.1 Металографічний аналіз.....	32
2.2.2 МікродюрOMETричний аналіз.....	33
2.2.3 Рентгенофазовий аналіз.....	35
2.3 Висновки до розділу 2.....	36
3 РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ.....	37
3.1 Хімічний склад сплавів.....	37
3.2 Мікроструктура та мікротвердість сплавів на основі Cu.....	38
3.3 Фазовий склад сплавів на основі Cu.....	41
3.4 Висновки до розділу 3.....	42
4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	43

4.1 Науково-технічна актуальність теми дослідження.....	43
4.1.1 Мета і завдання НДР.....	43
4.2 Розрахунок планових витрат на проведення НДР.....	44
4.2.1 Витрати на оплату праці.....	44
4.2.2 Визначення розміру єдиного соціального внеску.....	46
4.2.3 Матеріали необхідні для проведення досліджень.....	46
4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання.....	47
4.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій.....	47
4.2.6 Визначення витрат на службові відрядження.....	48
4.2.7 Інші прямі невраховані витрати по темі.....	48
4.2.8 Накладні витрати.....	48
4.2.9 Розроблення планової калькуляційної кошторисної вартості НДР.....	48
4.3 Науково-технічна ефективність НДР.....	50
4.4 Висновки до розділу 4.....	53
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	54
5.1 Аналіз параметрів приміщення.....	54
5.2 Мікроклімат робочої зони.....	55
5.3 Аналіз освітлення приміщення.....	56
5.4 Організація робочого місця.....	57
5.5 Виявлення і аналіз наявності шуму.....	58
5.6 Виробниче випромінювання.....	58
5.7 Безпека при роботі з електричними приладами.....	59
5.8 Пожежна безпека.....	60
5.9 Висновки до розділу 5.....	60
ВИСНОВКИ.....	62
CONCLUSIONS.....	63
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ

СПФ – сплави з пам'яттю форми;

ЕПФ – ефект пам'яті форми;

МП – мартенситне перетворення;

ГОІ – государственный оптический институт.

НДР – науково-дослідна робота;

ЄСВ – єдиний соціальний внесок;

T_v – транспортно-заготівельні витрати;

V_m – витрати на матеріали;

I_v – інші прямі витрати;

N_v – накладні витрати;

$E_{\text{НДР}}^y$ – умовний ефект НДР;

Б – бальна оцінка ефективності;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності;

$V_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР;

E_ϵ – Коефіцієнт умовної економічної ефективності.

ВСТУП

Однією з головних задач сучасного матеріалознавства є створення матеріалів на основі металів з наперед заданими властивостями, якими можна керувати. Дуже перспективним питанням є дослідження та розробка “розумних матеріалів”, або так званих smart-materials. Це матеріали, які мають фізико-хімічні та фізико-механічні характеристики, які змінюються під дією тиску, механічної деформації, температури, магнітного та електричного поля [1]. Такими матеріалами є сплави з ефектом пам’яті форми (СПФ). Вони набули значної популярності в багатьох сучасних галузях. Розробки в напрямку освоєння та створення нових СПФ та виготовлення з них різних предметів активно ведуться в як в науково-технічних, так і медичних галузях і стосуються інтересів представників різних спеціальностей – від фізиків та інженерів до лікарів.

Вибір в дослідженнях СПФ на основі Cu обґрунтований тим, що мідь є відносно не дорогою, сплави на її основі мають гарні властивості пам’яті форми і надпружності та їх простіше виготовляти ніж наприклад Ni-Ti, за рахунок нижчої температури плавлення.

Мета роботи – дослідження впливу термічної обробки на структуру і властивості сплавів з пам’яттю форми на основі Cu та на величину ефекту пам’яті форми та надпружності.

Об’єктом дослідження є сплави з пам’яттю форми на основі Cu-Al-Mn.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Актуальність і застосування сплавів з пам'яттю форми

Протягом останніх двадцяти років широкої популярності набули конструкційні матеріали нового покоління, більш відомі як розумні, або інтелектуальні матеріали. Особливістю таких матеріалів є те, що за рахунок в них датчиків, які здатні реагувати на зовнішній вплив та зміну середовища, ними можна керувати та програмувати виробу з таких матеріалів на виконання певних задач. Керуючі пристрої налаштовуються та програмуються з урахуванням вимог до конструкції, умов її експлуатації та властивостей конструкційного матеріалу, конструктивно-технологічних факторів, дефектів мікроструктури та ін. [2].

Сплави з пам'яттю форми є представниками сімейства розумних матеріалів, які здатні миттєво реагувати на деякі види зовнішніх стимулів, при цьому змінюючи форму та запам'ятовуючи свою початкову морфологію. Відновлення форми відбувається за рахунок бездифузійного фазового перетворення між кристалічними структурами мартенситу та аустеніту. Цей процес називається ефектом пам'яті форми (ЕПФ) [3].

Ефект пам'яті форми – це здатність металів або сплавів певного складу повертатися до вихідної форми при нагріві після деформації. Особливістю даного механізму в таких матеріалах є властивість перетворювати механічну енергію на теплову і навпаки .

На рисунку 1.1 показано схему проходження ефекту пам'яті форми. У вихідному стані матеріал має певну структуру, яка позначена синіми квадратами. При проходженні деформації зовнішня частина матеріалу витягується, а внутрішня навпаки стискається – позначено червоними прямокутниками. Ці структури є мартенситними пластинами. В той час центральна частина залишається незмінною. При нагріві в мартенситних пластинах проявляється термопружність і з'являються внутрішні напруження, за рахунок яких структура повертається у вихідний стан.

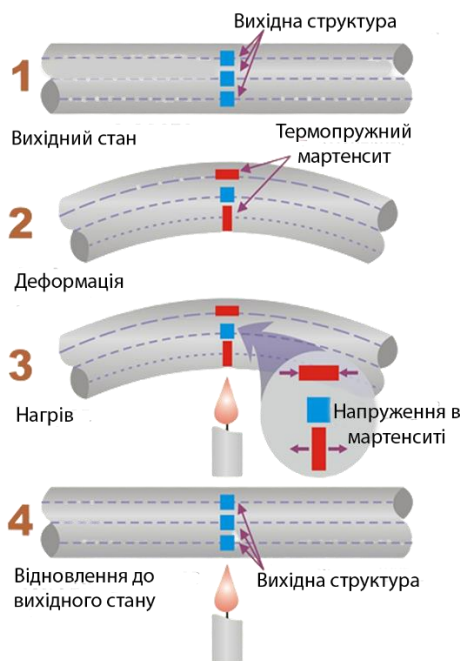


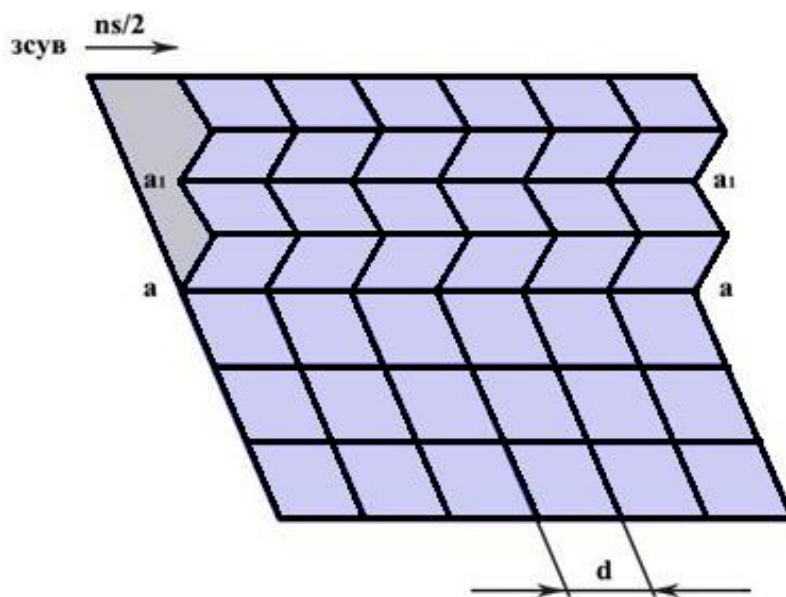
Рисунок 1.1 – Демонстрація механізму ефекту пам'яті форми [4]

Явище ефекту пам'яті форми реалізується за рахунок мартенситного перетворення.

Мартенситне перетворення (МП) є бездифузійним, воно являє собою перетворення ґратки деформацією зсуву великих ансамблів атомів та супроводжується деформаційними явищами. Проходить в кристалічному твердому тілі при низьких температурах, внаслідок яких з його вихідної фази утворюється мартенситна фаза з новою кристалічною ґраткою.

При появі у вихідній фазі пластинчастих чи лінзоподібних областей атоми рухаються не по одному, а єдиним ансамблем (комплексом), деформація зсуву відбувається рядами, один за одним, в результаті відбувається перехід ґратки вихідної фази у мартенситну ґратку. При проходженні цього процесу зберігається відношення між вузлами початкової (вихідної) фази та мартенситною ґраткою. У результаті такого кооперативного руху зберігається однозначна відповідність між вузлами вихідної фази та ґраткою мартенситу. При умові, якщо ґратка вихідної фази є впорядкованою, то внаслідок відповідності ґратка мартенситної фази також є впорядкованою.

Схематичне зображення процесу мартенситного перетворення показано на рисунку 1.2. У гратці вихідного стану матеріалу, яка має параметр гратки d (міжатомна відстань), вздовж площини ковзання aa проходить зсув на вектор s у всіх шарах кристалу, $ns/2$ – значення зсуву у n -му шарі. Утворена після зсуву система має іншу кристалічну будову, ніж початкова, а отже новоутворена фаза повинна мати іншу енергію. При умові, що початкова енергія менша, то утворений кристал має стимул для повернення в початковий стан.



d – міжатомна відстань; aa – перша площина зсуву; a_1a_1 – друга площина зсуву; $ns/2$ – значення зсуву у n -му шарі

Рисунок 1.2 – Схема процесу мартенситного перетворення [5]

Існує доволі багато матеріалів в яких може проходити мартенситне перетворення. Серед них є як чисті метали, такі як Fe, Co, Ti, U, Li, Na, Zr, Ce, Tl та інші. Також є багато сплавів на основі цих металів, найкращі властивості пам'яті форми серед них проявляють: Fe-Ni, Fe-Mn, Ti-Mo, Ti-Ni, Ti-Zr, Ti-Cr, Ti-Fe, U-Cr, Li-Mg, Cu-Al, Cu-Zn, Cu-Sn, Au-Cd, Mn-Cu, Co-Ni, In-Tl та інші [6].

Ще одним важливим явищем, за рахунок якого здійснюється ефект пам'яті форми є надпружність. Надпружністю це явище, при якому зразок, підданий

деформації, яка є більшою, ніж деформація звичайних металевих матеріалів до межі пружності, відновлює свою форму після зняття навантаження.

На рисунку 1.3 показано прояв надпружності матеріалу. Точка А відповідає вихідному стану аустенітного зразка сплаву. Далі зразок навантажується за температури M° (M° — температура початку мартенситного перетворення при дії механічної напруги). Ділянка АВ відповідає пружній деформації вихідної аустенітної фази. При напруженні, яке позначено точкою В, у сплаві починають з'являтися мартенситні кристали, і на ділянці ВС йде поява мартенситу напруження. При цьому деформація зразка відбувається через зміну форми в наслідок МП; у зразку накопичується внутрішня енергія у разі виникнення та розвитку мартенситної фази. МП в об'ємі зразка завершується в точці С. Ділянка СС' відповідає пружній деформації мартенситної фази, що утворилася. Значення напруги, що відповідає межі плинності мартенситної фази, позначена D у даному випадку не досягають, розвантаження матеріалу починають у точці С'. У процесі розвантаження на ділянці С'F зникає пружна деформація мартенситної фази. Потім на ділянці FG, йде зворотне перетворення мартенситу в аустеніт, і на ділянці GA зникає пружна деформація аустеніту. Деформація, що відповідає ефекту надпружності, досягає 10 %, що значно перевищує звичайні значення пружної деформації полікристалічних металів, які зазвичай сягають десятих відсотка. При цьому більша частина надпружної оборотної деформації відповідає ділянці оборотного мартенситного перетворення FG. Деформація на цій ділянці називається надпружною.

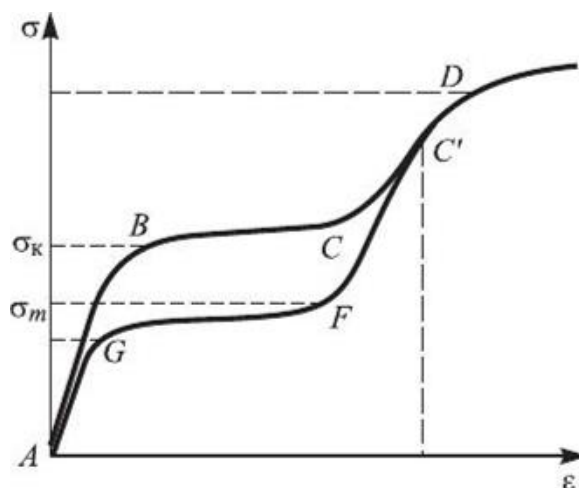


Рисунок 1.3 – Схема кривої «напруга-деформація», що ілюструє прояв надпружності матеріалу [7]

Ефект пам'яті форми був відкритий близько 90 років тому, у 1932 році шведським вченим та дослідником Арне Оландером, який в ході своїх дослідів помітив таку властивість у сплавах системи Au-Cd. Трохи пізніше у 1938 році вчені Гренінгер і Моредієн спостерігали виникнення і зникнення мартенситної фази за рахунок зменшення та збільшення температури сплаву Cu-Zn.

Однак на протязі наступних 30 років ці відкриття так і залишалися без значної уваги. Значимого застосування дане явище отримало лише на початку 1958 року, коли інженер-металург лабораторії Збройних Сил ВМС США Уільям Бюлер проводив свої досліді з різними сплавами, метою яких було підібрати найбільш ідеальний для виготовлення частини човнової ракети. Він визначив, що сплав Ni-Ti володіє низкою необхідних властивостей, таких як: висока ударна міцність, корозійна стійкість, пружність, ковкість та втомна міцність. Такий сплав отримав назву «Нітинол» (Nitinol), від символів хімічних елементів, з яких складається сплав приблизно в рівних пропорціях - нікель (Ni) та титан (Ti). Для того, щоб нітинол отримав властивості запам'ятовувати свою переддеформівну форму, його необхідні піддати відпалу за температури 500 °C протягом години. Завдяки проведенню відпалу в сплаві з'являється тверда, непружна та високотемпературна фаза аустеніту. При подальшому охолодженні утворюється пружна низькотемпературна мартенситна фаза. В результаті проведення таких

технологічних обробок при деформуванні зразка і його нагріві за рахунок теплового руху атомів вибудовуватися кристалічна гратка аустеніту, що призводить до повернення початкової форми [8].

Описане вище явище класифікується як односторонній ефект пам'яті форми, при якому матеріал може запам'ятовує лише одну форму. Проте існують також матеріали, які можуть запам'ятовувати дві різноманітні форми, в залежності від температур, одну форму за високих температурах, іншу за більш низьких. Таке явище має назву двосторонній ефектом пам'яті форми [9].

Також матеріали з пам'яттю форми умовно поділяються на ті, в яких відбувається повне відновлення форми при нагріванні, а також ті, де початкова форма відновлюється не повністю (частково). До першої групи відносяться мідні легovanі сплави (Cu-Al-[Ni, Mn, Co, Fe], Cu-Zn-Al, Cu-Sn), а також деякі сплави на основі титану Ti-Ni і Ti-Ni-[Cr, Al, Fe, Cu]. Тоді як до другої групи з не повним поверненням форми відносяться в основному залізні сплави (Fe-Ni, Fe-Mn-[Si, Cr, Ni], Fe-Ni-Cr) [10].

Першим застосуванням сплаву з пам'яттю форми було виготовлення у 1971 році на основі Ni-Ti-Fe з'єднувальних втулок, які використовувалися для з'єднання труб гідравлічної системи військового літака F-14 (рис. 1.4). Таких сполучень у винищувачі близько 300 тисяч [11].



Рисунок 1.4 – З'єднувальна втулка [11]

Спочатку втулку піддають механічній обробці за кімнатної температури доки її внутрішній діаметр не стане меншим ніж зовнішній діаметра труб, які з'єднують. Потім втулку охолоджують в азоті і розтягують, щоб її внутрішній діаметр став трохи більшим ніж діаметр труби. В кінці трубу вставляють у втулку і залишають, щоб вона нагрівалася до своєї початкової температури. В процесі нагрівання, при якому втулка стискається до початкового діаметру, а також за рахунок внутрішніх виступів, відбувається щільне з'єднання.

На сьогодні однією із найбільш відомих галузей, де використовуються сплави с пам'яттю форми є медицина, а одним з найбільш розповсюджених сплавів є зокрема нітінол. За рахунок біосумісності титату із тканинами організму від вже протягом тривалого часу використовується в медицині для виготовлення різного роду протезів та мікроімплантів.

Саме СПФ, і насамперед нікелід титану, дедалі ширше та ефективніше використовуються в різних галузях медицини, ставши основою нових унікальних технологій, які мають багато позитивних результатів. Завдяки використанню інструментів, виготовлених з цього матеріалу, значно покращили якість та полегшили процес лікування, в деяких випадках навіть виключили необхідність хірургічного втручання.

Використання матеріалів з ЕПФ не лише дозволило покращити традиційні, але й отримати деякі абсолютно нові функціональні властивості конструкцій, сильно збільшивши сферу їх практичного застосування. Існує досить багато медичних інструментів та виробів де застосовуються СПФ: судинні протези та фільтри, клапани, оклюдери, кісткові імплантати, екстрактори жовчного та сечового каміння, пульпоекстрактори, сітки для герніопластики – це лише невелика частина прикладів застосування таких матеріалів [12].

На рисунку 1.5 показано приклад застосування ендопротезу, виготовленого із СПФ. Подібні протези використовуються для відновлення кровотоку стегнової артерії, як це показано на рисунку 1.6.

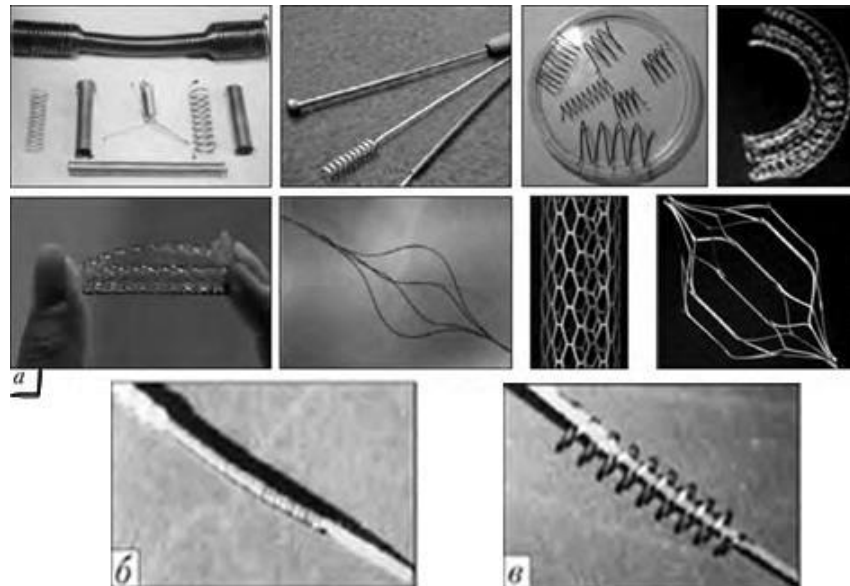


Рисунок 1.5 – Типи ендопротезів у складеному вигляді (а) та після нагрівання до 370 °С (б),(в) [12]

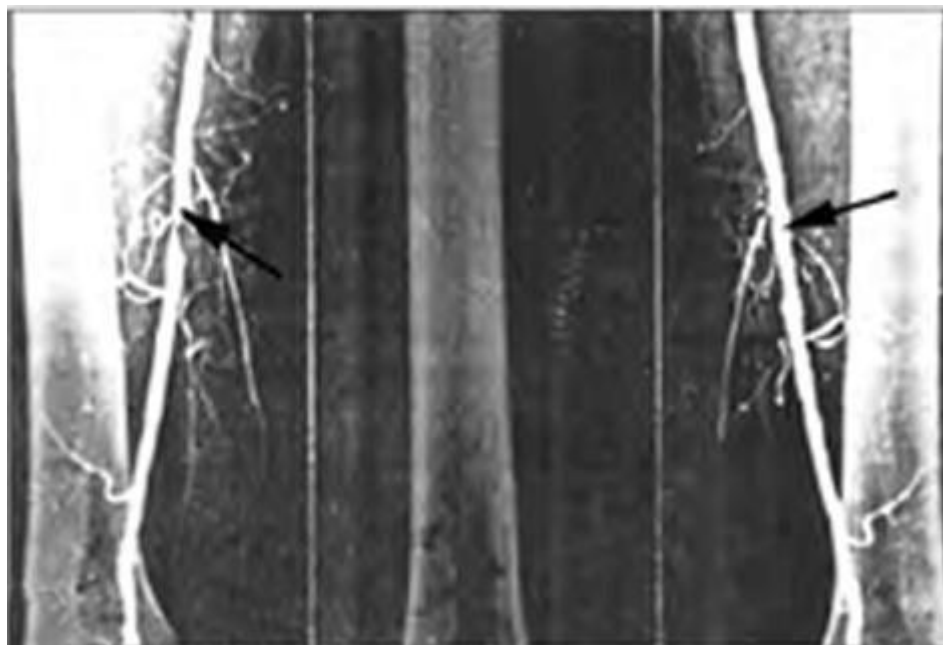


Рисунок 1.6 – Протезування стегнової артерії (зліва стрілками показано місце звуження; праворуч – відновлення кровотоку в оперованій артерії) [12]

Окрім протезів медичні вироби із СПФ також використовуються для виготовлення шунтів для судин, або наприклад стравоходу – через свою

біосумісність вони не відторгаються організмом, а за рахунок ЕПФ виконують свою функцію по розширенню. Приклади шунтів зображені на рисунку 1.7.

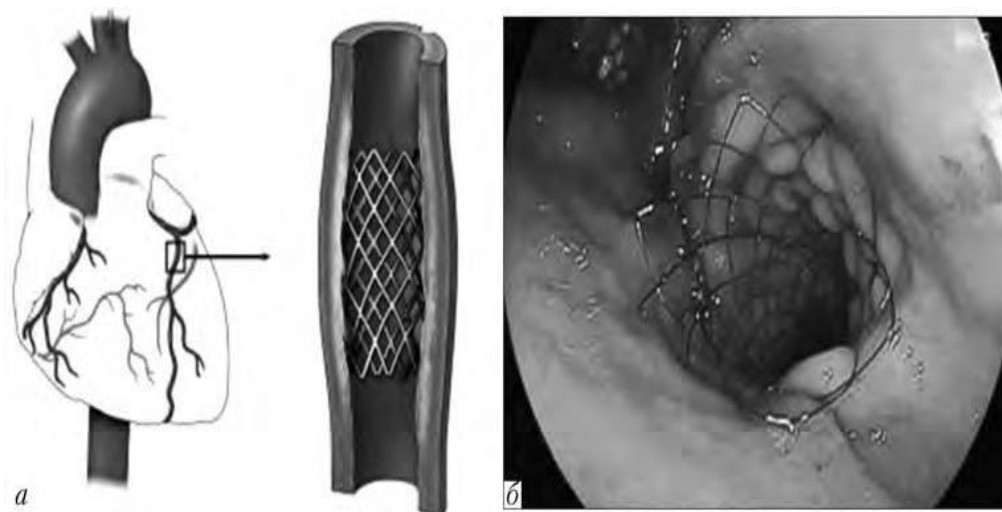


Рисунок 1.7 – Шунтування коронарних судин (а) та стравоходу нітіноловим протезом (б) [12]

Попри всі свої переваги найбільш використовуваний в медицині сплав нітінол (NiTi) все ж має великий недолік, адже нікель, якого приблизно половина в складі сплаву не є біосумісним. Крім того нікель входить до списку канцерогенних речовин, що доведеного епідеміологічними даними. А отже на сьогоднішній день стоїть задача знайти більш підходящий сплав, який міг би замінити нітінол в медицині. В основі таких сплавів можуть бути такі метали як Cu та Fe [13].

1.2 Структура, властивості, мартенситні перетворення в сплавах на основі Cu

Сплави з пам'яттю форми на основі Cu, серед яких можна виділити сплави мідь-цинк (Cu-Zn), мідь-алюміній (Cu-Al) і мідь-олово (Cu-Sn) демонструють великий потенціал завдяки їх гарній відновлюваності форми, простоті виготовлення, відмінній тепло та електропровідностям. Також, на відміну від нітінолу, такі сплави є досить дешевими. Однак, використання таких сплавів все ще є досить обмеженим, через деякі недоліки термічної стабільності, крихкості та

механічної міцності, які тісно пов'язані з мікроструктурними характеристиками СПФ на основі Cu, серед таких недоліків: великий розмір зерен, висока пружна анізотропія та скупчення вторинних фаз та домішки вздовж меж зерен. На даний момент докладаються зусилля для боротьби з цими недоліками за допомогою додавання в систему третього компоненту, пошуку альтернативних шляхів обробки, а також оптимізації циклів термічної обробки [14].

Фазові перетворення мартенситного типу можуть проходити у великій кількості матеріалів та сплавів, що характеризуються структурними особливостями, які визначають особливості їх формування та фізичні властивості.

Пріоритетними в дослідженнях є сплави, в яких структурно-фазові перетворення мартенситного типу реалізуються в феромагнітній матриці. Серед них слід виділити Гейслерові сплави, інтерметалідні сполуки Co–Ni–Al, Co–Ni–Ga і сплави на основі Fe. Також відомим є механізм протікання МП, який реалізується за рахунок розпаду твердих розчинів з виділенням феромагнітних наночастинок у неферомагнітній матриці. Проходження таких процесів характерні для сплавів Cu–Co, Cu–Ni–Fe, Cu–Ni–Co.

В спаві Гейслера Cu–Mn–Al реалізація МП можлива тоді, коли в твердих розчинах утворюються концентраційні неоднорідності. Такими неоднорідностями є когерентні наночастинки, які виділяються при розпаді високотемпературної β_1 -фази сплаву Cu–Al–Mn, що когерентно зв'язаний з матрицею і при цьому не зазнає спонтанного МП при охолодженні.

Високотемпературна β_1 -фаза бінарних і потрійних Cu–Al сплавів має ОЦК-структуру, яка впорядкована за типом D03 [15]. Мартенситні фази, що утворюються в сплавах різного складу мають щільнопаковані структури, відрізняються порядком укладки щільнопакованих площин: β_1' (3R) або γ' (2H) [16]. Мартенситні кристали отримують з аустеніту когерентні частинки, кристалічна ґратка яких змінюється за рахунок пружної деформації, що обумовлена зміною умов сполучення ґраток наночастинок та матриці в ході протікання МП. За рахунок зміни режими старіння високотемпературної фази можна суттєво впливати на процес розпаду, що може призводити до суттєвої зміни характеристичних

температур і гістерезису МП у сплавах Cu–Mn–Al. Дотримуючись певних умов у процесі старіння можна досягати ситуації, яка призводить до підвищення температури початку МП і зменшення температурного гістерезису ΔT МП. Перша умова являє собою збідненням β_1 -матриці манганом, друга — зменшення деформації форми перетворюваної області внаслідок зменшення пружної енергії E_e на межі поділу фаз [17].

1.2.1 Фази в системі Cu-Al-Mn та діаграми фазової рівноваги

Подвійна діаграма стану системи Cu-Al досліджена по всій області концентрацій сплавів (рисунок 1.8). Кількість рідкої фази в точці евтектики відповідає 8,5 мас.% Al. Перитектичні реакції протікають при температурах 1036 °C і 1022 °C. Фаза χ існує лише області високих температур (1036-963) °C. Фаза β кристалізується з розплаву у виді кривої, максимум якої дорівнює температурі 1048 °C і відповідає сплаву, що містить 12,4 мас.% Al. У твердому стані проходять кілька евтектоїдних і перитектоїдних перетворень. Фаза розпадається при температурі 963 °C. У евтектоїдній точці вміст Al відповідає 15,4 мас.%. Концентраційні межі області гомогенності α_2 -фази точно не встановлені. Існування α_2 -фази пояснює перебіг температурної кривої питомої теплоємності за температури 300 °C, що спостерігається в однофазних та двофазних сплавах.

Фаза α представляє собою твердий розчин на основі Cu, який займає доволі широку область всього складу (до 9 мас. % Al), варто відзначити, що при зниженні температури розчинність Al в Cu підвищується. При температурі 1037 °C розчинність Al у твердій міді становить близько 7,4 мас.% [18-20].

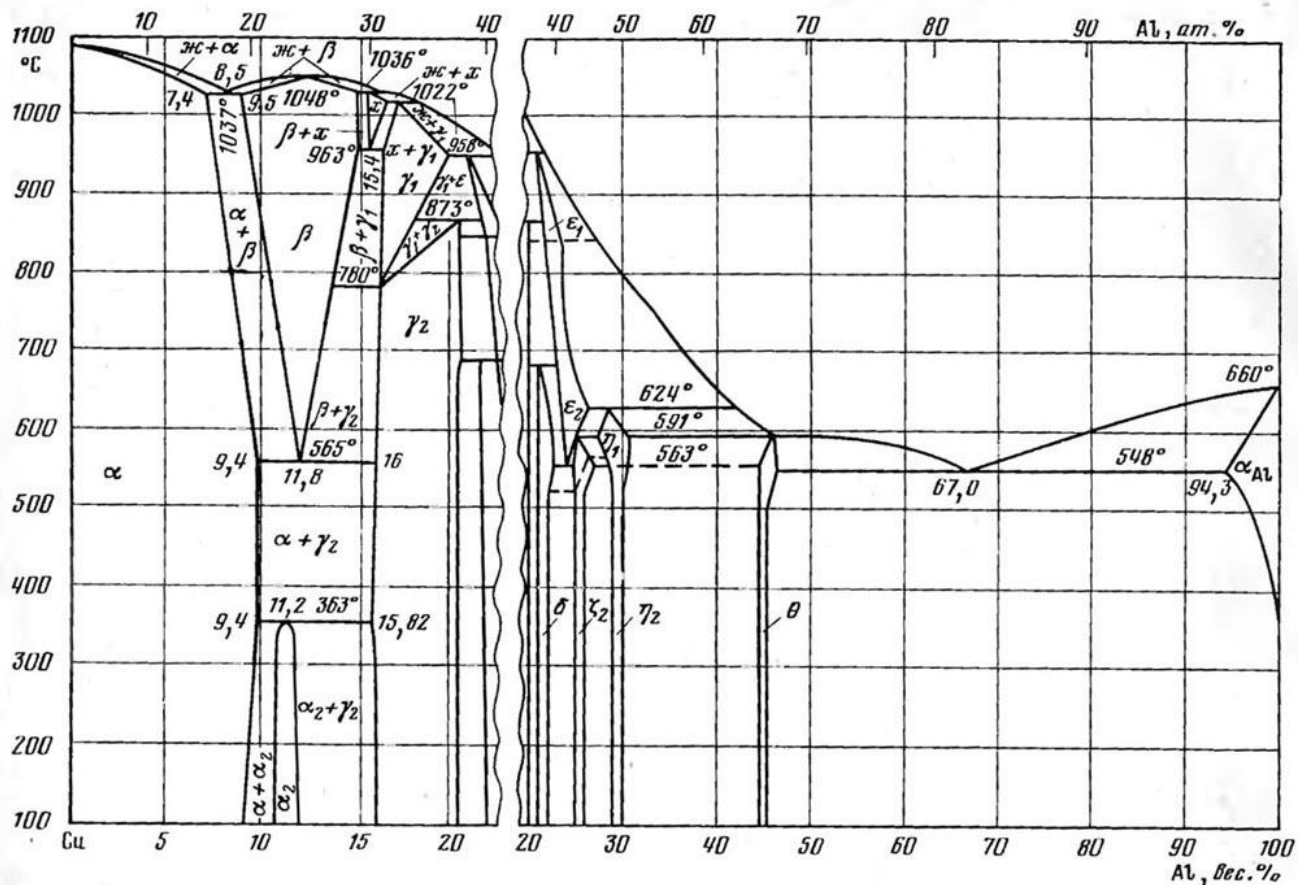


Рисунок 1.8 – Фазова діаграма двохкомпонентної системи Cu-Al [18]

Діаграма стану системи Cu-Al-Mn наведена на рисунку 1.9. У системі наявні три потрійні фази - T1, T2 та T3. Фаза T1 має область гомогенності (16-20) мас.% Cu, (28-30) мас.% Mn, (50-60) мас.% Al, температура плавлення фази становить 1020 °С. Склад фази T2: 49 мас.% Cu, 14 мас.% Mn, 37 мас.% Al. Фаза T3 складається: 58 мас.% Cu, 32,5 мас.% Mn, 9,5 мас.% Al. Твердий розчин на основі Cu (γ) при кімнатній температурі знаходиться в рівновазі з фазами Γ , T3 та α -Mn + β -Mn.

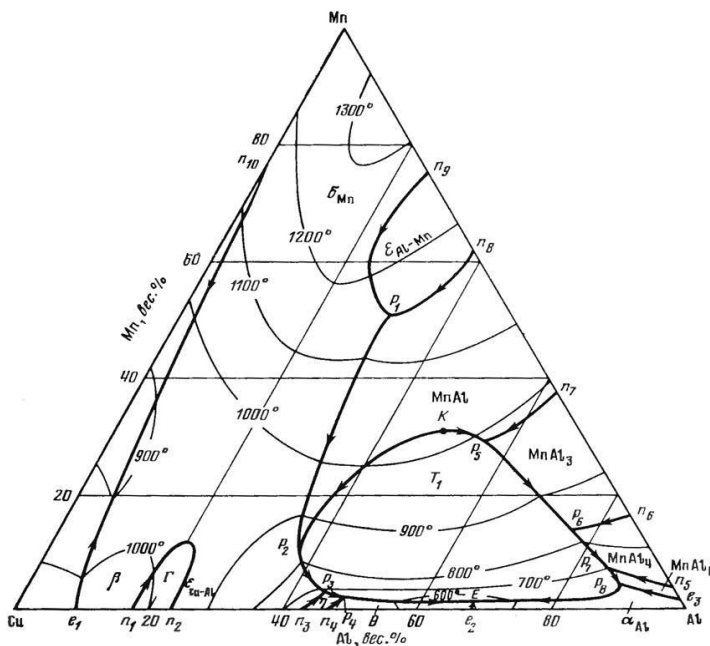


Рисунок 1.9 – Діаграма стану трьохкомпонентної системи Cu-Al-Mn [18]

1.2.2 Ефект пам'яті форми, надпружність, перспективність застосування сплавів з пам'яттю форми на основі Cu

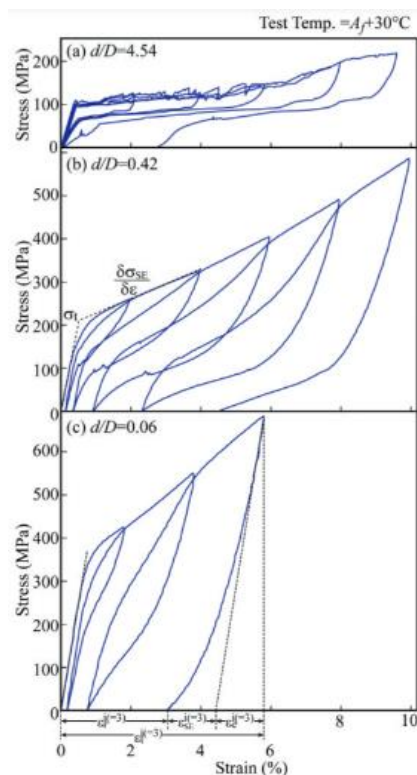
Сплави з пам'яттю форми (СПФ), такі як сплави на основі NiTi, сплави на основі Cu та Fe мають комерційний потенціал для практичного застосування завдяки своїм властивостям пам'яті форми. Серед вище перерахованих сплавів, найбільш привабливим для застосування є сплав на основі Cu. Використовують мідні сплави завдяки їх низькій вартості та гарним властивості пам'яті форми. Проте сплави на основі міді, такі як Cu-Al-Ni та Cu-Zn-Al з полікристалічною структурою, є занадто крихкими, тому над ними не можна провести холодну обробку з метою зміцнення. На даний момент проводиться велика кількість спроб покращити характеристики сплавів на основі Cu шляхом рафінування зерна [21, 22].

Ще у 1995 році професор Рюсуке Кайнума дослідив [23], що сплави Cu-Al-Mn із вмістом Al менше 17 % демонструють чудову пластичність і що полікристалічні сплави мають потенціал для використання в якості сплавів з пам'яттю форми. Існує велика кількість властивостей, таких як односторонній, двосторонній ефекти пам'яті форми, надпружність і низьке теплове розширення,

які характерні для сплаву Cu–Al–Mn [23-25]. Було досліджено, що мікроструктурний контроль розміру зерна різко покращує властивості надпружності до рівня сплавів NiTi [26].

Відомо, що властивості надпружності залежать від розміру зерна вихідної фази [27]. Було досліджено, що відновлювальна деформація збільшується із ростом відносного розміру зерна для зразків листа або дроту, яка визначається співвідношенням d/l чи d/D , де d , l та D - середній діаметр зерна, товщина листа та діаметр зразка дроту відповідно [26].

На рисунку 1.10 показані криві напруження-деформація, отримані в результаті циклічного випробування на розтяг зразків дроту з різним величинами параметрів d , l та D . Циклічне випробування проводилося при температурі $A_f + 30$ °C швидкості деформації $0,5$ мм/хв⁻¹ і довжині зразка на розтяг 50 мм. Як показано на рисунку 1.10, характеристики напруження-деформації сильно залежать від значення d/D . Зі зменшенням d/D межа текучості та швидкість зміцнення після деформації збільшується, а відновлювальне навантаження зменшується [26].



a – значеннями $d/D = 4.54$; b – значеннями $d/D = 0.43$; c – значення $d/D = 0,06$

Рисунок 1.10 - Циклічні криві напруження-деформація при вказаних значенням d/D [26]

Оскільки сплави з пам'яттю форми на основі структури Cu–Al–Mn демонструють чудові пластичність та властивості пам'яті форми, як зазначено вище, то можна очікувати їх застосування в багатьох різних галузях. В якості прикладу можна привести дріт для медичного використання, який продемонстровано на рисунку 1.11 [28]. Напрямний кінець дроту має чудову надпружність, яка покращує його маневрування в розгалужених кровоносних судинах, як показано на рисунку 1.11. Також дріт на основі Cu–Al–Mn має гарні функціональні характеристики, які можна отримати, керуючи мікроструктурою. На рисунку 1.12 показана залежність довжини напрямного дроту x від кривих вигину, отриманих за допомогою триточкового випробування на вигин при кімнатній температурі, де центр зразка для випробування на вигин відповідає позиції x . Тут розмах калібру для випробування на триточковий згин становив 14 мм, а приблизне значення радіусу кривизни при максимальному відхиленні становило 8 мм, при якому максимальна поверхнева деформація, прикладена до дроту, складала (1 - 3) %. Можна помітити, що частина напрямного дроту на відступі від кінчика ($x=50$ мм) демонструє чудову гнучкість і надпружність, які можна отримати шляхом контролю середнього розміру зерна, в той час як частина напрямного дроту в позиції $x=400$ мм до кінця демонструє високу жорсткість і міцність і майже не проявляє властивості надпружності. Підвищення жорсткості та міцності викликані бейнітним перетворенням, через старінням при температурі (200-400) °C. Такий дріт завдяки своїм властивостям може бути використаний для виготовлення катетерів нового типу [28].

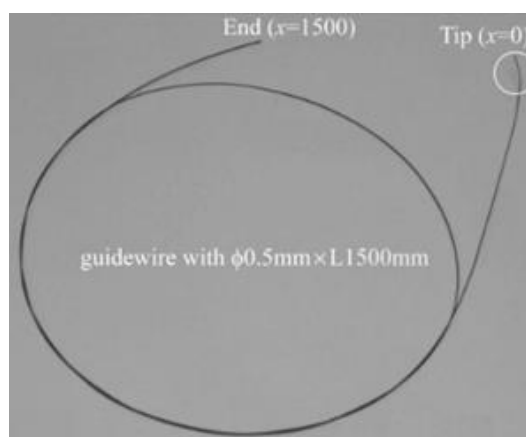


Рисунок 1.11 – напрямний дріт, виготовлений із сплаву на основі міді [28]

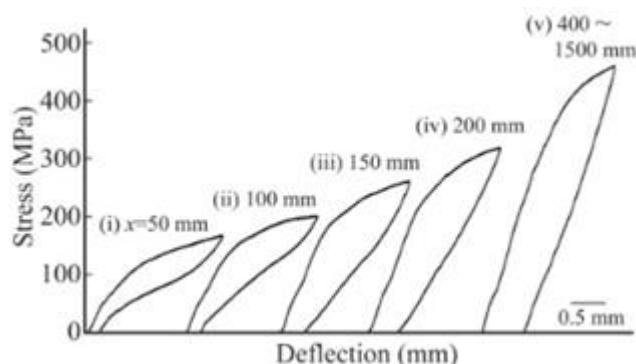


Рисунок 1.12 – залежність вигинання дроту від напруження, що діє на нього [28]

1.3 Структура, властивості, мартенситні перетворення в сплавах на основі Fe

Сплави з пам'яттю форми на основі Fe представляють собою один із видів інтелектуальних функціональних матеріалів з властивістю надпружності за кімнатної температури мають широку перспективу застосування в цивільному будівництві, біомедицині та багатьох інших галузях завдяки перевагам високої міцності, гарній піддатливості до обробки при низьких температурах та не високій вартості матеріалу [29-33]. Термопружне МП в сплаві на основі Fe-Ni-Co, відкрите професором Рюсуке Кайнумою [34].

Сучасні дослідження показали, що для отримання гарних властивостей пам'яті форми в сплавах системи Fe-Ni-Co необхідно отримати специфічні орієнтації зерен [35-36]. Було виявлено [36], що монокристалічний сплав Fe-Ni-Co-Al отримав чудову надпружну деформацію до 5,2 % після відповідної обробки старінням у розчині для отримання відповідної кількості γ' -осадів. Крім того, згідно з відповідними дослідженнями сплавів із пам'яттю форми, відновлювана деформація в сплаві має сильну орієнтаційну залежність через оборотне МП, викликане напруженням [37-40]. Наприклад, коли напрямки навантаження Cu-Al-Ni та Cu-Al-Mn СПФ були паралельні до орієнтації зерна $\langle 001 \rangle$, тоді була отримана чудова надпружність.

Серед факторів, що впливають на оборотність непружної деформації за ЕПФ та надпружності, можна відзначити: термопружність МП; кристалографічну

оборотність МП; оборотність деформації, руху дефектів решітки; само утворення комплексів кристалів мартенситу [22, 41-43].

Термопружний характер мартенситних перетворень реалізується в сплавах системи Fe-Ni-Co-Ti за умови дотримання деяких умов [41]. Основним моментом, що визначає можливість оборотності мартенситного перетворення, є створення системи когерентних наночастинок γ' -фази, рівномірно розподілених в об'ємі аустенітної матриці. У процесі пошуку режимів термічної обробки, які сприяють виникненню МП, було виявлено, що для сплавів цієї системи, особливо з вмістом титану менше 5 мас.%, необхідний тривалий відпал [22, 41]. Деякі сплави вимагають відпалу більше 5 годин для отримання необхідного відсотка перетвореного об'єму, що призводить до холодноламкості сплавів. Це, в свою чергу обмежує рівень прикладених напружень і величину оборотної деформації.

1.3.1 Фази в системі Fe-Co-Ni та діаграми фазової рівноваги

Діаграму стану системи Fe-Co наведено на рисунку 1.13. У системі при температурі 1499 °C протікає перитектична реакція $\rho \leftrightarrow \delta + \gamma$ в інтервалі складів (16,5-19,5) ат.% Co. В області (55-60) ат % Co на кривій ліквідус є мінімум при температурі близько 1477 °C. Фаза δ утворює замкнуту область, яка існує до температури 1392 °C. Co підвищує температуру поліморфного перетворення Fe (911-985) °C при 45 ат.%. У сплавах з високим вмістом Co область $\alpha + \gamma$ розширюється і при 300 °C вона розташовується між (73,5 і 92,5) ат.% Co. У твердих розчинах з високим вмістом Co відбувається бездифузійне перетворення $\gamma + \alpha \leftrightarrow \epsilon$. Температура перетворення знижується до кімнатної у сплавах з (91-93) ат.% Co [18-20].

Встановлено існування в системі впорядкованої структури, що базується на складі сполуки Fe-Co, що містить 51,35 мас.% Co. За даними термічного аналізу, упорядкування починається приблизно при 730 °C, а термічні ефекти спостерігаються в металах, що містять (40,5-60,3) ат% Co. Температура початку упорядкування (725-732) °C. При вимірюванні електроопору, твердості, магнітних та інших властивостей виявлено аномалії в поведінці з'єднання Fe-Co,

стрибкоподібну зміну властивостей при деяких температурах. Вважають, що перетворення при 730 °С є переходом другого роду [18-20].

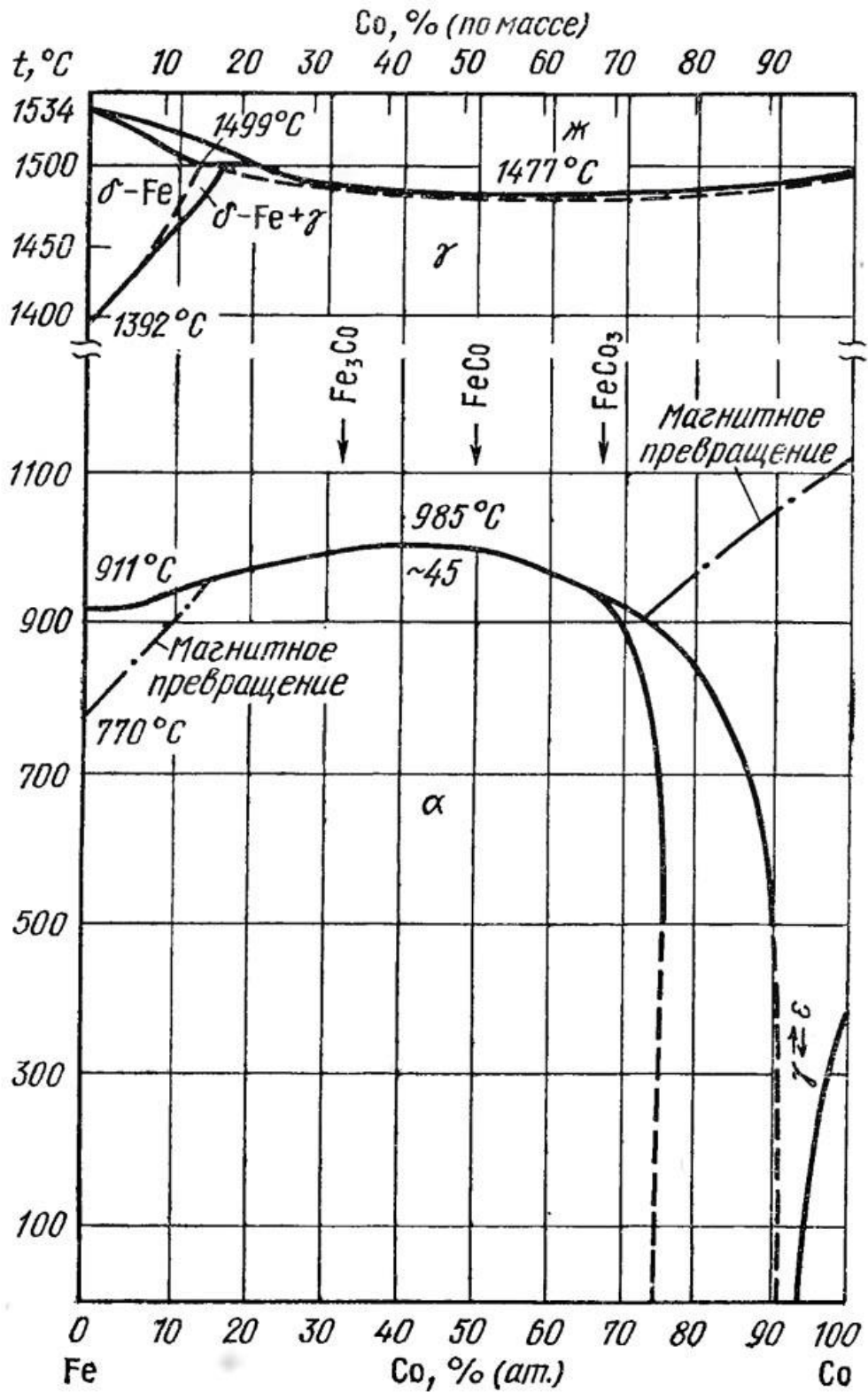


Рисунок 1.13 – Фазова діаграма двохкомпонентної системи Fe-Co [18]

Діаграма стану системи Fe-Co-Ni наведена на рисунку 1.14. Показано ізотермічні розрізи системи при температурах 500 °С, 600 °С і 800 °С. На діаграмі присутні наступні фази: α із ОЦК решіткою, γ із ГЦК та впорядкованими α^* на основі з'єднання Fe-Co. Видно, що зі збільшенням температури зменшується область існування α^* -фази, тому що знижується ступінь упорядкування, зникаючи вище за критичну температуру. Тому на ізотермічному розрізі при 800 °С область α^* -фази повністю відсутня. Також, із підвищенням температури зменшується область $\alpha+\gamma$ [18-20].

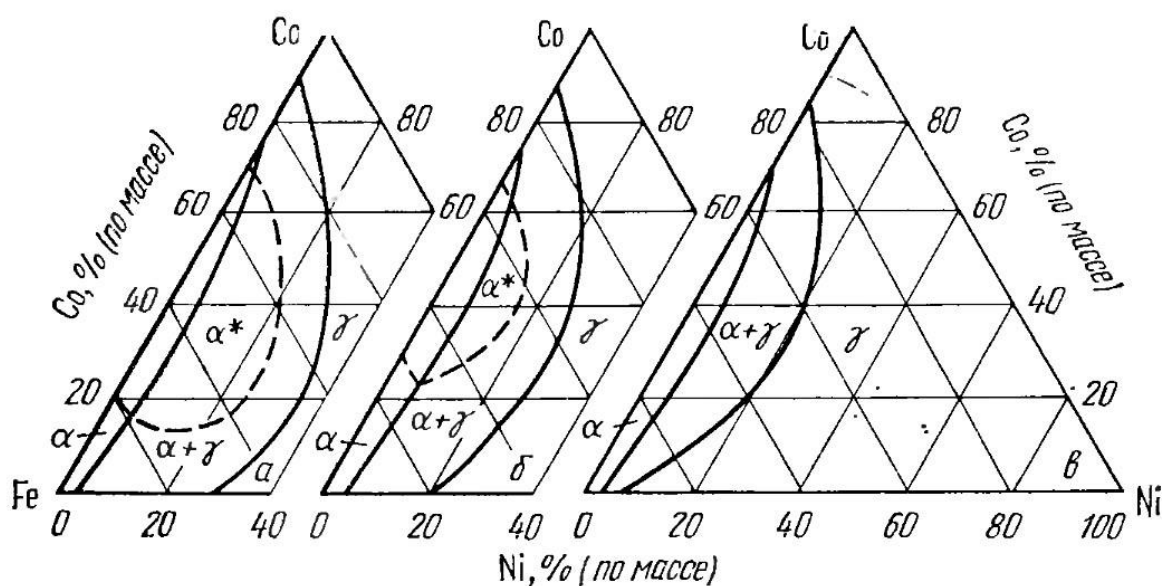


Рисунок 1.14 – Фазова діаграма трьохкомпонентної системи Fe-Co-Ni [18]

1.3.2 Ефект пам'яті форми, надпружність, перспективність застосування сплавів з пам'яттю форми на основі Fe

В сплавах системи Fe-Ni-Co-Ti максимальні ефекти пам'яті форми та надпружності досягаються за рахунок контролю термопружності МП. Це реалізується шляхом створення системи осаджених наночастинок при старінні високотемпературної фази, що створює умови для з'єднання аустенітних та мартенситних ґраток. Це спричиняє зниження температурного гістерезису [42] перетворення із збільшенням ступеня тетрагональності аустенітної фази та збільшенням оборотності термомеханічних ефектів.

При досягненні критичного значення напруження – межі текучості σ_y при відхиленні від області пружного навантаження утворюється деформований мартенсит (рисунок 1.15). У першому циклі навантаження утворенню мартенситу передуює пластична деформація матеріалу, через що значення надпружності є доволі малим. З кожним наступним циклом навантаження значення надпружності збільшується. Під зовнішніми впливами в результаті зсувних деформацій відбувається утворення кристалів мартенситу, переважно орієнтованих у напрямку прикладеної сили, зростання яких відбувається за рахунок менш ідеальних кристалів [43].

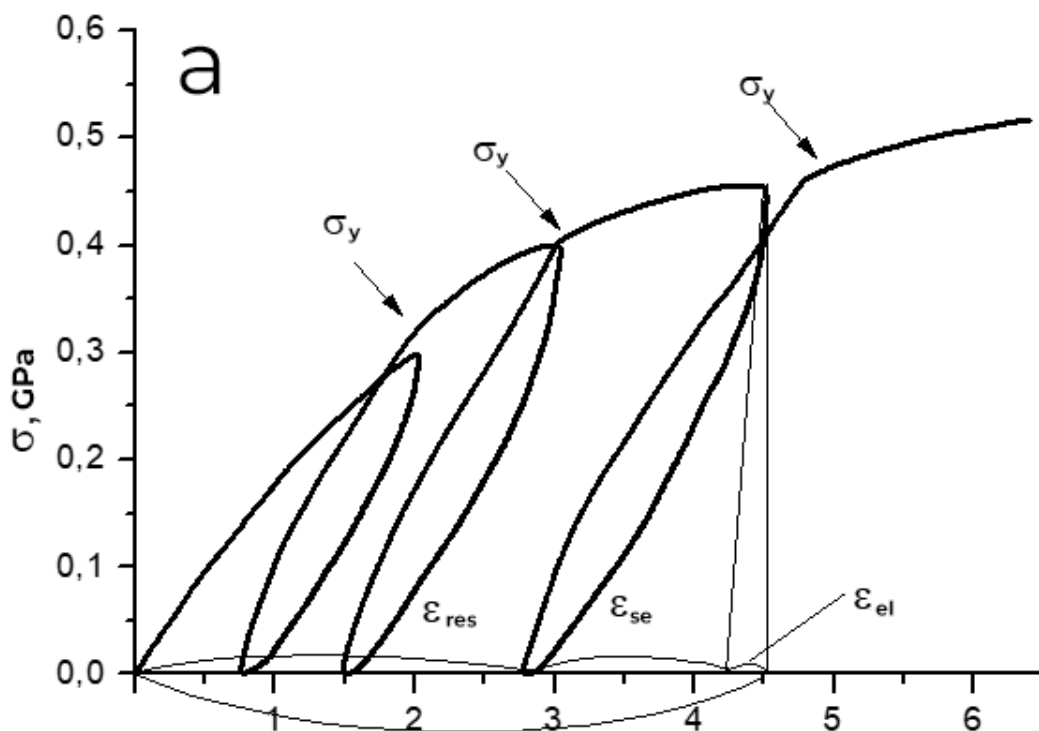


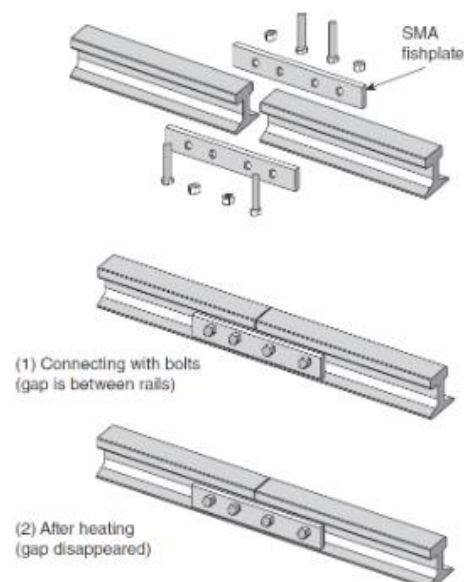
Рисунок 1.15 – Залежності напружень від деформації, отримані при випробуванні сплаву – Fe-37.0Co-15.2Ni-8.0Ti-6.17Cu в аустенітному стані при $T = 523$ K [43]

Ефект надпружності спостерігається для сплавів на основі Fe-Co-Ni в аустенітній і мартенситній фазах. Зі збільшенням часу відпалу α -аустеніту, за умови, що когерентність частинок α' -фази, що випадають з аустенітної матриці, зі збільшенням вмісту Cu, а також при навантаженні в мартенситному стані, надпружність Fe-Ni-Co-Ti сплавів збільшується за рахунок переорієнтації

мартенситних двійників. Максимальне значення надпружності у феромагнітному сплаві Fe-Ni-Co-Ti становить 4,45 %. Сплави цієї системи дещо поступаються іншим композиціям сплавів заліза за індукованою деформацією МП, але перевищують за значеннями механічного гістерезису, що разом дає можливість їх потенційного практичного застосування, наприклад, демпфери [44].

Завдяки таким параметрам як низька вартість, гарна оброблюваність та хороша зварюваність сплави з пам'яттю форми на основі Fe є досить перспективними.

Застосування сплавів з пам'яттю форми на основі заліза в будівельних спорудах все ще не надто розвинене, на даний момент існують лише деякі прототипи, в яких застосовуються залізні сплави з пам'яттю форми. Тим не менш, вже існують суміжні галузі, де використовуються такі сплави: виробництво рейкових пластин для кранів, для з'єднання рейок для важких кранів [45] (рисунок 1.16), а також трубних з'єднання для сталевих труб, які застосовуються в тунельних роботах, обидва продукти виробляються японською компанією Awaji Materia Co [46].



1 – пластина скріплюється з рейками за допомогою болтів; 2 – після нагрівання розрив між рейками зникає завдяки дії ефекту пам'яті форми у пластині

Рисунок 1.16 – Пластини для з'єднання рейок важких кранів [45]

1.4 Висновки до розділу 1

Проаналізувавши літературні джерела на тему сплавів з пам'яттю форми, можна зробити висновок, що такі сплави є дуже перспективними і тому широко використовуються в багатьох галузях. Адже за рахунок того, що поведінку матеріалу з пам'яттю форми можна заздалегідь задати, керуючи їх хімічним складом та обробкою, вони можуть вирішити багато прикладних задач в різних сучасних галузях. Дуже перспективними зокрема є сплави на основі Fe та Cu, які мають гарні властивості пам'яті форми та низьку вартість.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали дослідження

Матеріалом для дослідження було вибрано сплави системи Cu-Al-Mn. Для визначення впливу легуючих елементів на структуру, властивості сплавів та на протікання мартенситного перетворення, для кожного сплаву були підібрані різні пропорції хімічних елементів, так як відомо, що легуючі елементи знижують температуру протікання МП. До одного із зразків в якості легуючого елементу був доданий 1 % заліза, що покращує властивості пам'яті форми. Хімічний склад сплавів було визначено за допомогою флуоресцентного рентгеноспектрального аналізу [49]: № 1 – $\text{Cu}_{83,1}\text{Al}_{10,8}\text{Mn}_{6,1}$; № 2 – $\text{Cu}_{82,8}\text{Al}_{10,2}\text{Mn}_{6,1}\text{Fe}_{0,9}$; № 3 – $\text{Cu}_{85,5}\text{Al}_{10,6}\text{Mn}_{3,9}$; № 4 – $\text{Cu}_{89,5}\text{Al}_{8,2}\text{Mn}_{2,3}$. Сплави були виплавлені у індукційній печі в атмосфері Ar. Після цього був проведений гомогенізуючий відпал протягом 10 годин за температури 1123 К. Із сплавів були виготовлені 4 зразки для досліджень, довжина яких становила 20 мм, а поперечний переріз дорівнював (2×2) мм. Над зразками були проведені відпал та загартування. Отримані зразки гартували у воді та відпалювали протягом 3 годин за температури 498 К.

2.2 Методика дослідження

2.2.1 Металографічний аналіз

Аналіз мікроструктури металів та сплавів є важливою частиною проведення металургійної експертизи. За допомогою нього можна дізнатися про наявність внутрішніх дефектів металу, слідів термообробки або пластичної деформації, та багато іншого. В результаті виходячи з отриманих даних можна дізнатися про якість досліджуваного матеріалу [47].

Для проведення аналізу необхідно виготовити шліфи досліджуваного матеріалу. Спочатку був виготовлений зразок методом спікання у бакелітовій струбціні. Поверхня шліфа повинна бути плоскою та мати якомога меншу кількість дефектів, таких як подряпини, сколи, різного роду забруднення. Для цього

зразок шліфувався на абразивних паперах різної дисперсності (400, 800, 1200, 1500, 2000, 2500). Після цього мікрошліф був відполірований на полірувальних кругах із фетровою тканиною, спочатку з додаванням води, а потім на кругу із додаванням шліфувальної пасти на основі Cr_2O_3 , яка має назву – паста ГОІ (Государственный оптический институт). Коли мікрошліф набув прийняттого виду його поверхня була протравлена за допомогою реактиву. В якості реактиву виступав 15 % розчин хлорного заліза (FeCl_3) розведений у етиловому спирті. Тривалість травлення складала декілька хвилин, після чого травник був змитий під проточною водою.

Аналіз мікроструктури досліджуваного зразка проводився за допомогою методу металографічного аналізу за допомогою мікроскопу Selmi PEM-106 при збільшеннях (100 – 2500) разів, зі значенням прискорюючої напруги – 20 кВ, та приладу ПМТ-3М зі збільшенням в 130 разів.

2.2.2 МікродюрOMETричний аналіз

Вимірювання мікротвердості за допомогою мікродюрOMETричного аналізу часто проводиться для дослідження змін механічних властивостей внаслідок зразків після термомеханічної обробки.

МікродюрOMETричний аналіз проводиться на приладі ПМТ-3М, точність вимірювань окуляра-мікрометра на якому складає $\pm 0,5$ поділки шкали на барабані. В якості індентора використовується чотиригранна алмазна пірамідка з кутом в 136° при вершині.

Етапи вимірювання мікротвердості наступні:

- 1) зразок закріплюється на предметному столі, та на ньому фокусується зображення за допомогою мікро- та макрометричних гвинтів;
- 2) обирається місце куди буде нанесено відбиток;
- 3) на стрижень встановлюється оптимальний навантажувач;
- 4) ідентор вдавлюється в зразок на протязі 20 секунд, потім знімається;
- 5) зразок повертається під об'єктив для вимірювання розміру відбитка.

За отриманими даними розраховували середню мікротвердість зразків після термомеханічної обробки [48].

Значення мікротвердості H_{μ} , (ГПа), було визначено за формулою:

$$H_{\mu} = \frac{18.2P}{\langle d \rangle^2} [\text{ГПа}] = \frac{1.854P}{\langle d \rangle^2} \left[\frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \right] \quad (2.1)$$

де P – навантаження на індентор;

d – значення середнього арифметичного довжини двох діагоналей відбитка, мм.

$$\langle d \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n (d_{i1} + d_{i2})}{2n} \quad (2.2)$$

де d_{i1} і d_{i2} – довжини діагоналей чотирикутного відбитка (мм);

n – кількість проведених вимірювань.

Середнє квадратичне відхилення випадкової складової похибки вимірювань довжини діагоналі визначається за наступною формулою (мм):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\langle d \rangle - \frac{(d_{i1} + d_{i2})}{2} \right)^2}{n-1}} \quad (2.3)$$

Середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного значення довжини діагоналі відбитка визначається за формулою (мм):

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.4)$$

Отже значення мікротвердості можна визначити за формулою:

$$H_{\mu} = \frac{1.854P}{(\langle d \rangle \pm \sigma_0)^2} \quad (2.5)$$

Відносна похибка вимірювання мікротвердості δH_{μ} , %, визначається за формулою

$$\delta H_{\mu} = \frac{|H_{\mu}(\langle d \rangle) - H_{\mu}(\langle d \rangle \pm \sigma_0)|}{H_{\mu}(\langle d \rangle)} \times 100\% \quad (2.6)$$

Абсолютна похибка ΔH_{μ} , ГПа, визначається:

$$\Delta H_{\mu} = H_{\mu}(\langle d \rangle) - H_{\mu}(\langle d \rangle \pm \sigma_0) \quad (2.7)$$

Після вимірювання мікротвердості відносна похибка $\delta H_{\mu} = \pm 4 \%$, а максимальна абсолютна похибка становила не більше $\Delta H_{\mu} = \pm 0,7$ ГПа [48].

2.2.3 Рентгенофазовий аналіз

В роботі зразки сплавів системи Cu-Al-Mn проаналізовано методом рентгенофазового аналізу, для досліджень використовувався дифрактометр Rigaku Ultima IV, який обладнаний сцинтиляційним лічильником та використовує випромінювання $\lambda_{\text{Cu-K}\alpha}$. Дослідження проведені у фокусуєчій геометрії за Бреггом-Брентано [50].

За допомогою якісного фазового аналізу порівнюють експериментальні значення міжплощинних відстаней і відносні інтенсивності з еталонними рентгенограмами. Фазовий аналіз дозволяє ідентифікувати фази, що присутні в зразку. Якщо в об'єкті досліджень є декілька фаз, то кожна з них буде мати свою дифракційну картину, а дифрактограма буде представляти собою накладання всіх фаз, присутніх у зразку. В якості об'єктів дослідження можуть виступати метали, сплави на їх основі, руди, хімічні сполуки. Рентгенофазовим аналізом можна визначити наявність та склад неметалічних включень в металах, це можуть бути карбіди, оксиди, сульфіди.

Умовою дифракції рентгенівського випромінювання у кристалі є підпорядкування закону Вульфа–Брегга, який визначає напрямок виникнення максимумів дифракції пружно розсіяного на кристалі рентгенівського випромінювання.

Рівняння Вульфа – Брегга:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2.8)$$

де λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання, нм;

d – міжплощинна відстань, Å;

θ – кут дифракції рентгенівських променів, °;

n - порядок дифракційного максимуму.

Вимірювання, реєстрація та відображення змін інтенсивності дифрагованого рентгенівського випромінювання залежить від кута обертання об'єкту досліджень, в результаті отримується дифрактограма зразка. Аналізуючи інтенсивність та положення піків на дифрактограмі можна за допомогою проведення кількісного та якісного фазового аналізу визначити параметри решітки та дізнатися про можливі дефекти кристалічної будови. За допомогою кутів піків і профілів можна визначити діаметра частинок та ступінь кристалічності [51].

2.3 Висновки до розділу 2

1. В якості об'єкту дослідження виступають 4 сплави системи Cu-Al-Mn, від кожного з яких був відрізаний зразок довжиною 20 мм, та з поперечним перерізом (2×2) мм, над якими було проведено загартування та відпал. Вибір сплавів з різними хімічними складами обумовлений метою дослідження впливу легуючих елементів на механічні властивості та ефект пам'яті форми, в залежності від концентрації цих елементів в сплаві.

2. Обрані методи проведення аналізів зразків для досліджень (флуоресцентний рентгеноспектральний, металографічний, мікродюрOMETричний та рентгенофазовий). Проведення таких аналізів дає змогу детально дослідити структуру та властивості обраного сплавів системи Cu-Al-Mn.

3 РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Хімічний склад сплавів

Перед виготовленням сплавів проводилося шихтування. Крім основних компонентів Cu-Al-Mn, один із сплавів має в своєму складі Fe, кількістю близько 1 %. Шихтування проводилось для того, щоб потрапити у високотемпературну область існування твердого β -розчину на основі Cu. При охолодженні загартуванням у воду отримали пересичений твердий розчин нерівноважної β -фази. При подальшому старінні розчину починають виділятися частинки феромагнітної β_3 -фази Cu_2AlMn .

Хімічний склад зразків на основі сплаву з ЕПФ Cu-Al-Mn досліджено методом флуоресцентного рентгеноспектрального аналізу. Отримані дані занесено в таблиці 3.1 – 3.4.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сплаву Cu-Al-Mn (сплав № 1)

Хімічний елемент	Масова частка, %	Похибка, %
Cu	83,1	$\pm 0,2$
Al	10,8	$\pm 0,2$
Mn	6,1	$\pm 0,1$

Таблиця 3.2 – Хімічний склад сплаву Cu-Al-Mn (сплав № 2)

Хімічний елемент	Масова частка, %	Похибка, %
Cu	82,8	$\pm 0,2$
Al	10,2	$\pm 0,2$
Mn	6,1	$\pm 0,1$
Fe	0,9	$\pm 0,03$

Таблиця 3.3 – Хімічний склад сплаву Cu-Al-Mn (сплав № 3)

Хімічний елемент	Масова частка, %	Похибка, %
Cu	85,5	± 0,2
Al	10,6	± 0,2
Mn	3,9	± 0,04

Таблиця 3.4 – Хімічний склад сплаву Cu-Al-Mn (сплав № 4)

Хімічний елемент	Масова частка, %	Похибка, %
Cu	89,5	± 0,2
Al	8,2	± 0,2
Mn	2,3	± 0,03

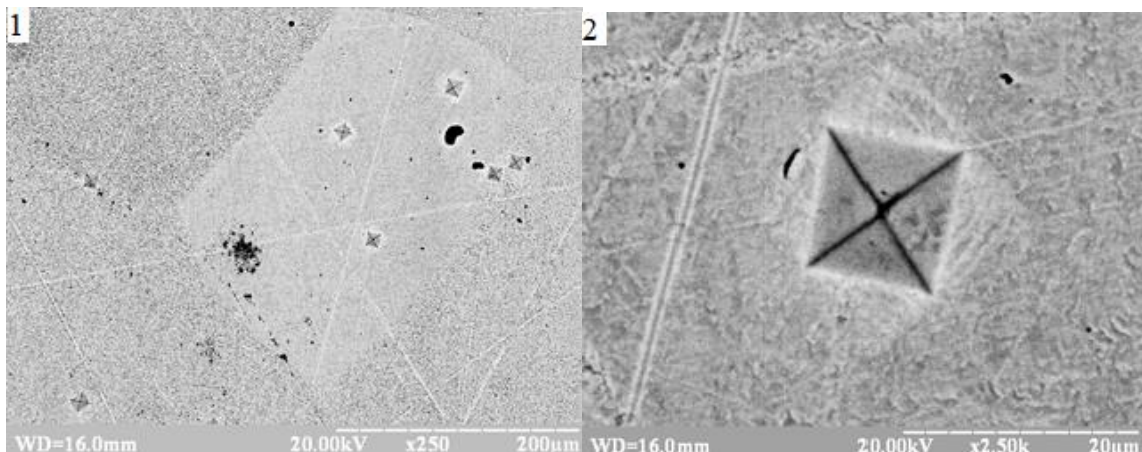
3.2 Мікроструктура та мікротвердість сплавів на основі Cu

Для того, щоб дослідити мікроструктури зразки було протравлено 15 % розчином хлорного заліза ($FeCl_3$) розведеного в етиловому спирті.

Мікроструктури зразків після різних режимів термічної обробки отримані за допомогою приладів Selmi PEM-106 та ПМТ-3М при різних збільшеннях.

На рисунку 3.1 показано структуру зразку № 1 ($Cu_{83,1}Al_{10,8}Mn_{6,1}$) після загартування при збільшеннях в 250 і 2500 разів. Хімічний склад цього зразка наведено в таблиці 3.1. Розмір зерна даного зразка становить близько 300 мкм. Після загартування сплав представляє собою однофазний твердий розчин Mn та Al в ОЦК гратці Cu, з гомогенною високотемпературною β -фазою. Аустенітна структура без утворення мартенситу.

Вимірявши мікротвердість зразка було отримано значення – 2,8 ГПа.

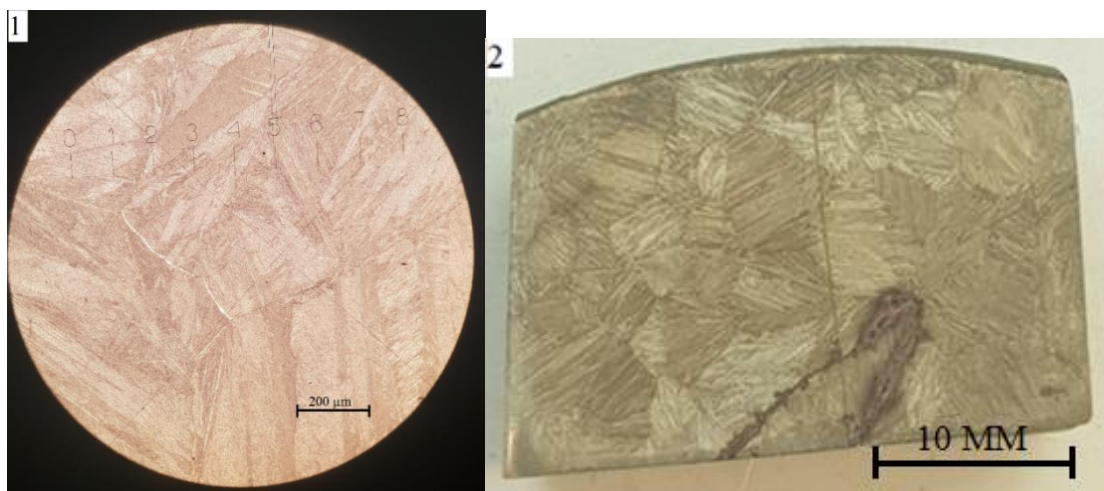


1) збільшення у 250 разів; 2) збільшення у 2500 разів

Рисунок 3.1 – Мікроструктура сплаву ($\text{Cu}_{83,1}\text{Al}_{10,8}\text{Mn}_{6,1}$) після загартування

На рисунку 3.2 показано структуру сплаву № 2 ($\text{Cu}_{82,8}\text{Al}_{10,2}\text{Mn}_{6,1}\text{Fe}_{0,9}$) після загартування при збільшенні в 130 разів та без збільшення. Хімічний склад зразка наведено в таблиці 3.2. Варто відмітити, що окрім основних елементів Cu, Al, Mn сплав легований 1 % Fe. Інтенсивність травлення цього зразка досить висока. Після загартування сплав представляє собою пластинчасту структурою мартенситу, де мартенситне перетворення протікає вище кімнатної температури. За рахунок легування залізом розмір зерен в цьому зразку дуже великий, приблизно 5 мм, тому їх можливо побачити навіть без збільшення (рисунок 3.2 (2)). Завдяки великим зернам сплав має гарні властивості пам'яті форми.

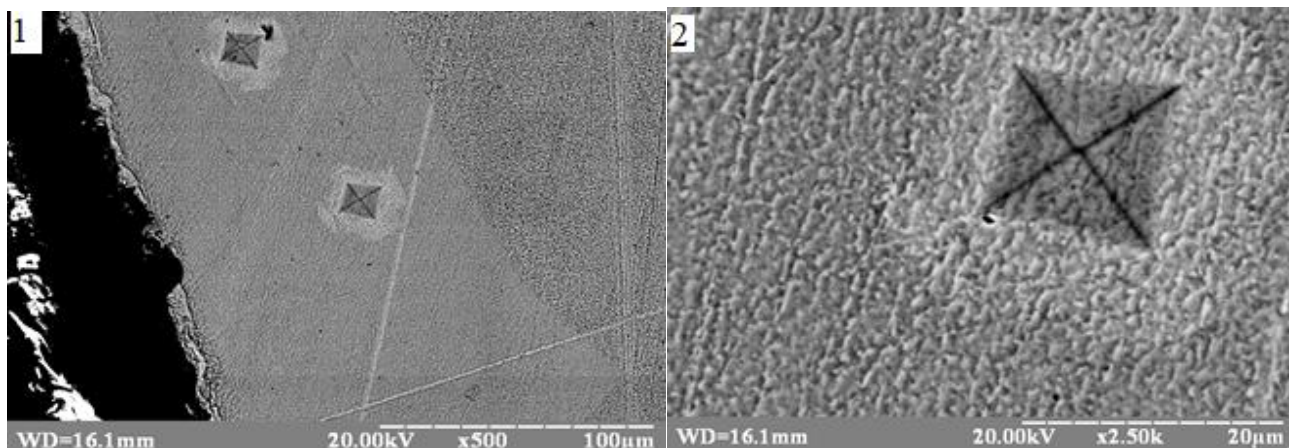
Мікротвердість зразка складає – 2,7 ГПа.



1,3 – збільшення у 130 разів; 2 – без збільшення

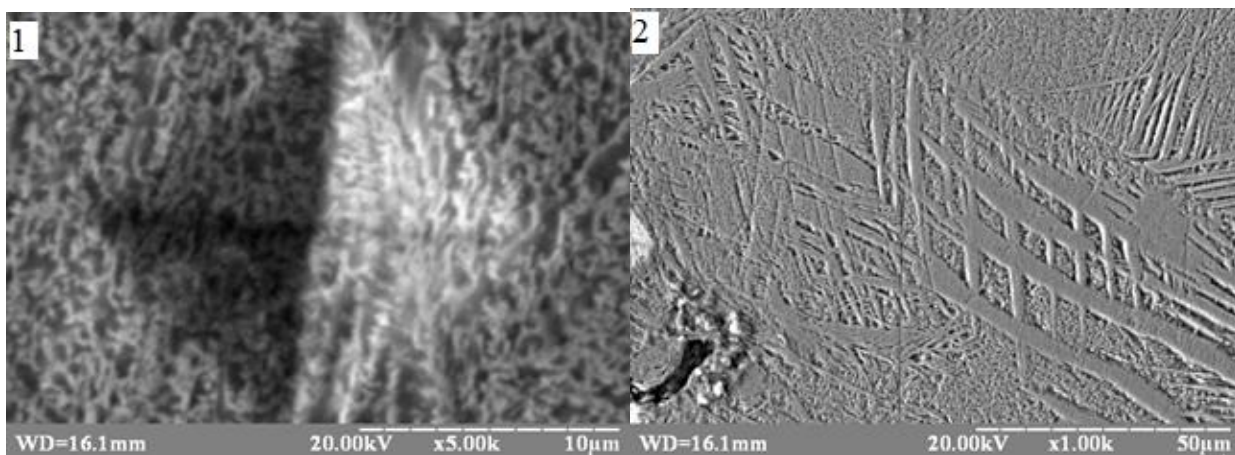
Рисунок 3.2 – Мікроструктура сплаву ($\text{Cu}_{82,8}\text{Al}_{10,2}\text{Mn}_{6,1}\text{Fe}_{0,9}$) після загартування

На рисунках 3.3 – 3.4 показано структури сплавів № 3 ($\text{Cu}_{85,5}\text{Al}_{10,6}\text{Mn}_{3,9}$) та № 4 ($\text{Cu}_{89,5}\text{Al}_{8,2}\text{Mn}_{2,3}$) після відпалу. Хімічні склад сплавів зазначено в таблицях 3.3 – 3.4. Після відпалу сплаву № 3 утворився пересичений твердий розчин з аустенітною β -фазою з якої в процесі старіння виділилися частинки феромагнітної β_3 -фази (Cu_2AlMn). Мартенсит в структурі утворюється за температури нижче кімнатної, тому його можна побачити на структурі. У сплаві № 4 після відпалу утворилася β -фаза з виділеннями частинок β_3 -фази (Cu_2AlMn), за рахунок чого температура МП підвищується. Можна побачити залишкову пластинчасту структуру мартенситу, яку при проходженні МП отримав аустеніт. Значення мікротвердості для сплаву № 3 становить – 2,4 ГПа. Мікротвердість сплаву № 4 – 2,5 ГПа.



1) збільшення 500 разів; 2) збільшення 2500 разів

Рисунок 3.3 – Мікроструктура сплаву ($\text{Cu}_{85,5}\text{Al}_{10,6}\text{Mn}_{3,9}$) після відпалу



1) збільшення в 5000 разів; б) збільшення в 1000 разів

Рисунок 3.4 – Мікроструктура сплаву ($\text{Cu}_{89,5}\text{Al}_{8,2}\text{Mn}_{2,3}$) після відпалу

3.3 Фазовий склад сплавів на основі Cu

В результаті проведення рентгеноструктурного фазового аналізу для зразків сплавів № 1 ($\text{Cu}_{83,1}\text{Al}_{10,8}\text{Mn}_{6,1}$) та № 3 ($\text{Cu}_{85,5}\text{Al}_{10,6}\text{Mn}_{3,9}$), над кожним з яких був проведений певний вид термічної обробки, а саме: загартування та відпал, отримані дифрактограми продемонстровані на рисунках 3.5 – 3.6.

На рисунку 3.5 продемонстрована дифрактограма зразка № 1 ($\text{Cu}_{83,1}\text{Al}_{10,8}\text{Mn}_{6,1}$), який було загартовано у воду. На ній видно наявність високотемпературного стану – аустенітна β -фаза, пересичений твердий гомогенний розчин Mn та Al в ОЦК гратці Cu. β -фаза при температурі 500 °C переходить в β_2 -фазу. При охолодженні до 300 °C і нижче відбувається впорядкування β -фази, при цьому утворюється Cu_3Al β_1 -фаза кубічної структури типу DO_3 .

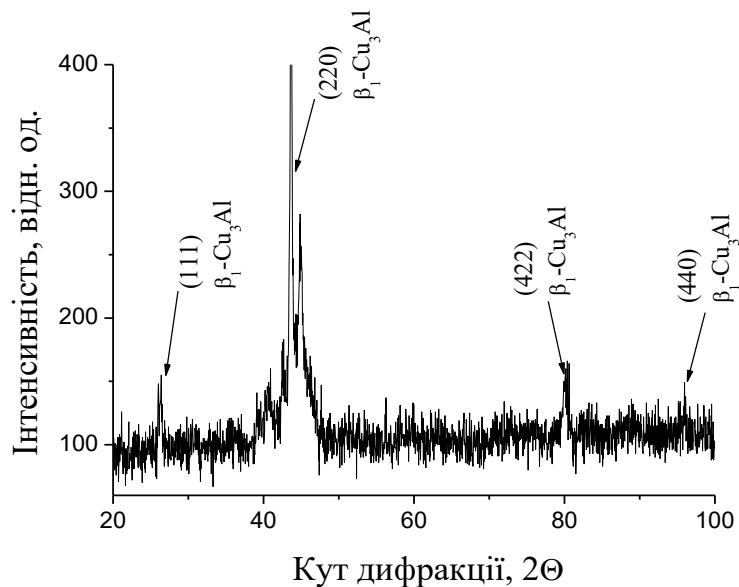


Рисунок 3.5 – Дифрактограма зразка сплаву $\text{Cu}_{83,1}\text{Al}_{10,8}\text{Mn}_{6,1}$, отримана в монохроматизованому випроміненні Cu-аноду (після загартування)

На рисунку 3.6 продемонстрована дифрактограма зразка № 3 ($\text{Cu}_{85,5}\text{Al}_{10,6}\text{Mn}_{3,9}$), який було відпалено. Наявні лінії від β_1 -фази Cu_3Al . Також присутні рефлекси від магнітної β_3 -фази (Cu_2AlMn).

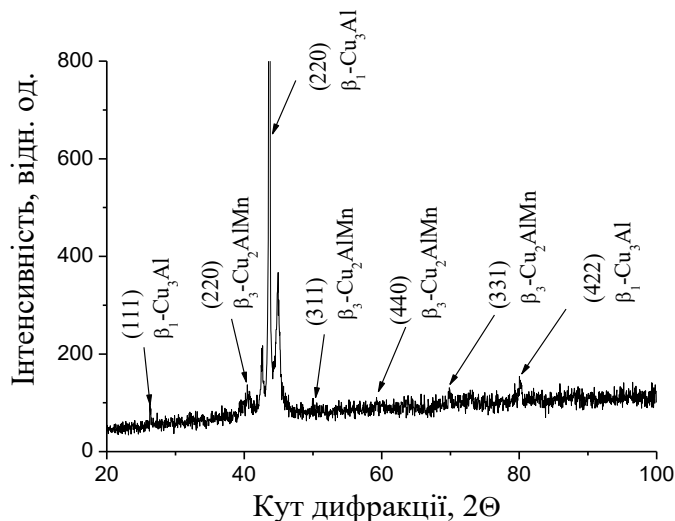


Рисунок 3.6 – Дифрактограма зразка сплаву $\text{Cu}_{85,5}\text{Al}_{10,6}\text{Mn}_{3,9}$, отримана в монохроматизованому випроміненні Cu-аноду (після відпалу)

За рахунок проходження дифузії з нерівноважної фази виділяються дисперсні частинки феромагнітної β_3 -фази Cu_2AlMn , в подальшому β_1 -фаза Cu_3Al впорядковується, як це показано на рисунку 3.6.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Було досліджено хімічний склад зразків на основі Cu-Al-Mn методом флуоресцентного рентгеноспектрального аналізу, один із зразків було леговано Fe, що призвело до зміни структури зразка із аустеніту в мартенсит при кімнатній температурі та росту зерен, за рахунок чого покращилися властивості пам'яті форми.

2. Встановлено, що відпал сприяє виділенню феромагнітної фази β_3 -фази Cu_2AlMn при старінні пересиченого твердого розчину Al і Mn в Cu (загартованої β -фази), що призводить до появи рефлексів цієї фази на дифрактограмах, підвищення інтенсивності травлення мікроструктур та зменшенню мікротвердості сплавів. В той час сплави, які були загартовані мають структуру гомогенної високотемпературної β -фази без феромагнітної β_3 -фази.

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність теми дослідження

Розробка інтелектуальних матеріалів є дуже перспективним напрямком в сучасному матеріалознавстві. Такі матеріали мають фізико-хімічні та фізико-механічні характеристики, які змінюються під дією тиску, механічної деформації, температури, магнітного та електричного поля та інших можливих впливів [1]. Одними з таких матеріалів є сплави з пам'яттю форми, які за рахунок своїх насамперед заданих властивостей можуть повністю або частково відновлювати свою форму після деформацій. На даний момент такі матеріали є одними із найбільш досліджуваних в матеріалознавстві. Висока зацікавленість сплавами з пам'яттю форм обумовлена перспективністю їх використання в багатьох сучасних галузях, такими як медицина, автомобільне та аерокосмічне будівництво, електроніка, будівництво та багато інших.

Вибір в дослідженні сплавів на основі міді обумовлений в першу чергу їх низькою ціною та розповсюдженістю використання цього металу у великій кількості галузей. На відміну від більш популярних сплавів з пам'яттю форми на основі титану, мідь є набагато більш доступнішим металом та за рахунок надпружності та мартенситного перетворення має не гірші властивості пам'яті форми.

4.1.1 Мета і завдання НДР

Метою цієї роботи є дослідження протікання мартенситного перетворення, а також вплив цього процесу на структуру та властивості сплавів з пам'яттю форми на основі міді, в залежності від хімічного складу та термічної обробки. Важливим питанням також є перспективність використання матеріалів на основі мідних сплавів з пам'яттю форми.

Для досягнення обраної мети досліджень потрібно вирішити наступні завдання:

- 1) ознайомитись із науковими публікаціями із сфери досліджень, та пов'язаними із нею темами;
- 2) розробити якісну методику проведення досліджень до теми;
- 3) виготовити зразки для досліджень підібравши хімічний склад та обравши метод виготовлення;
- 4) підготувати зразки для досліджень виготовивши мікрошліфи;
- 5) дослідити структуру та мікротвердість зразків проведенням металографічного та мікродюраметричного аналізів;
- 6) дослідити фазовий склад зразків за допомогою рентгенофазового аналізу;
- 7) провести обробку отриманих результатів.

4.2 Розрахунок планових витрат на проведення НДР

Розрахувати кошторисну собівартість даної роботи можна визначивши і оцінивши всі затрати в ході виконання НДР. Планова кошторисна вартість 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

Для розрахунку заробітної плати науково-технічного персоналу необхідно знати трудомісткість роботи виконавців та їх денну заробітну плату.

До виконання НДР було залучено трьох виконавців: старший науковий співробітник, інженер – дослідник та технік.

Якщо розрахункові методики трудомісткості різних етапів виконання НДР відсутні, то їх встановлюють за рахунок експертних оцінок, розрахованих провідними фахівцями. В таблиці 4.1 наведені результати оцінки трудомісткості етапів НДР.

Таблиця 4.1 – Трудомісткість етапів виконання НДР

Етапи проведення НДР	Старший науковий співробітник	Інженер – дослідник	Технік
1. Аналіз та опрацювання літератури з теми	8	15	-
2. Підготовка зразків для досліджень	5	5	2
3. Розробка методики досліджень	2	2	-
4. Проведення металографічного аналізу	2	6	6
5. Проведення мікродюрOMETричного аналізу	3	3	2
6. Проведення рентгенофазового аналізу	2	3	3
7. Опрацювання отриманих результатів та написання висновків	5	5	-
Висновки	27	34	13

Показники заробітної плати та підсумована планова трудомісткість кожного з виконавців наведені в таблиці 4.2. Інформація про заробітні плати виконавців в залежності від посади взята із “Штатного розпису” для національного технічного

університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського» від 01.12.2021.

Денна заробітна плата для кожного виконавця досліджень визначається як місячна заробітна плата, поділена на 21,2, що за підрахунками експертів визначено як середня кількість робочих днів за місяць при п'ятиденному робочому тижні.

Розмір загального заробітної плати всіх виконавців обчислюється як сума добутків трудомісткості і денної заробітної плати кожного з них.

Таблиця 4.2 – Розрахунок витрат на оплату праці

Посада	Планова трудомісткість люд-днів	Посадовий місячний оклад, грн	Денна зарплата, грн	Усього за виконавця, грн
Старший науковий співробітник	27	20876,34	984,73	26587,7
Інженер – дослідник	34	8921	420,8	14307,2
Технік	13	8554	403,5	5245,5
Разом оплата праці				46140,4

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:

$$\text{ЄСВ} = 46140,4 \times 0,22 = 10150,88 \text{ грн}$$

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 – Розрахунок вартості основних матеріалів

Найменування матеріалу	Одиниці вимірювання	Кількість	Ринкова ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Мідь високої чистоти	кг	0,350	3000	1050
Алюміній високої чистоти	кг	0,045	150	6,75
Манган високої чистоти	кг	0,02	4200	84
Залізо високої чистоти	кг	0,001	400	0,4
Загальні витрати				1141,15

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

$$T_b = 1441,15 \times 0,1 = 144,11 \text{ грн}$$

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

$$V_m = 1141,15 + 144,11 = 1285,26 \text{ грн}$$

4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання

Всі дослідження до НДР проводилися з використанням обладнання, яке є в наявності в лабораторіях «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського». 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 «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського». 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_B) приймаються за 10 % від врахованих при виконанні НДР:

$$I_B = (46140,4 + 10150,88 + 1255,26) \times 0,1 = 5754,65 \text{ грн}$$

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_B) встановлений в 20 % від суми прямих витрат:

$$H_B = (46140,4 + 10150,88 + 1255,26 + 5754,65) \times 0,2 = 12660,24 \text{ грн}$$

4.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Планова кошторисна вартість проведених досліджень визначається як сума витрат за всіма статтями вартості. Підрахунки вартості занесені до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1	2	3
1.Витрати на оплату праці	46140,4	Відповідно до розрахунків

Продовження таблиці 4.4

1	2	3
2.Єдиний соціальний внесок	10150,88	22,0 % від загальних витрат на оплату праці
3.Матеріали для проведення досліджень	1255,26	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	5754,65	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
9.Накладні витрати	12660,24	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)
10.Усього витрат по темі	75961,43	Сума попередніх статей

4.3 Науково-технічна ефективність НДР

Для визначення доцільності проведення роботи необхідно провести розрахунок очікуваного економічного ефекту 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:

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

де K_1 – показник важливості роботи;

K_2 – показник можливості використання результатів;

K_3 – показник вагомості теоретичного значення та рівня новизни дослідження;

K_4 – показник складності дослідження.

Бальна оцінка економічної ефективності даної НДР наведена у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1. Важливість розробки	K_1	Ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів	1
2. Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть користуватися у різних галузях	10
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів	5
4. Складність дослідження	K_4	Роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	5

Виходячи із даних таблиці 4.5 бальна оцінка ефективності для даної НДР становить:

$$B = 1 \times 10 \times 5 \times 5 = 250$$

Умовний ефект НДР визначається за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \times B - E_n \times V_{\text{НДР}} \quad (4.2)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

B – бальна оцінка ефективності;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (для роботи обрано значення – 0,25);

$V_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР;

Для даної роботи умовний ефект виконання НДР становитиме:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \times 250 - 0,25 \times 75961,43 = 106009,64 \text{ грн}$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності E_e показує наскільки рентабельним є виконання НДР. Коефіцієнт – це відношення умовного ефекту виконання НДР до сумарних витрат на виконання НДР та розраховується за формулою:

$$E_e = E_{\text{НДР}} / V_{\text{НДР}} \quad (4.3)$$

У даній роботі коефіцієнт умовної економічної ефективності буде становити:

$$E_e = 106009,64 / 75961,43 = 1,395$$

Отримали коефіцієнт умовної економічної ефективності НДР, який становить 1,395, отримане значення більше одиниці, отже виконання даної НДР є доцільним.

4.4 Висновки до розділу 4

Розраховано планову кошторисну вартість НДР, вона становить 75961,43 грн.

Підрахувавши коефіцієнт умовної економічної ефективності НДР для даної роботи отримали значення 1,395, яке є більшим за одиницю. Виходячи з цього зрозуміло, що проведення даного дослідження є ефективним з економічної точки зору.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

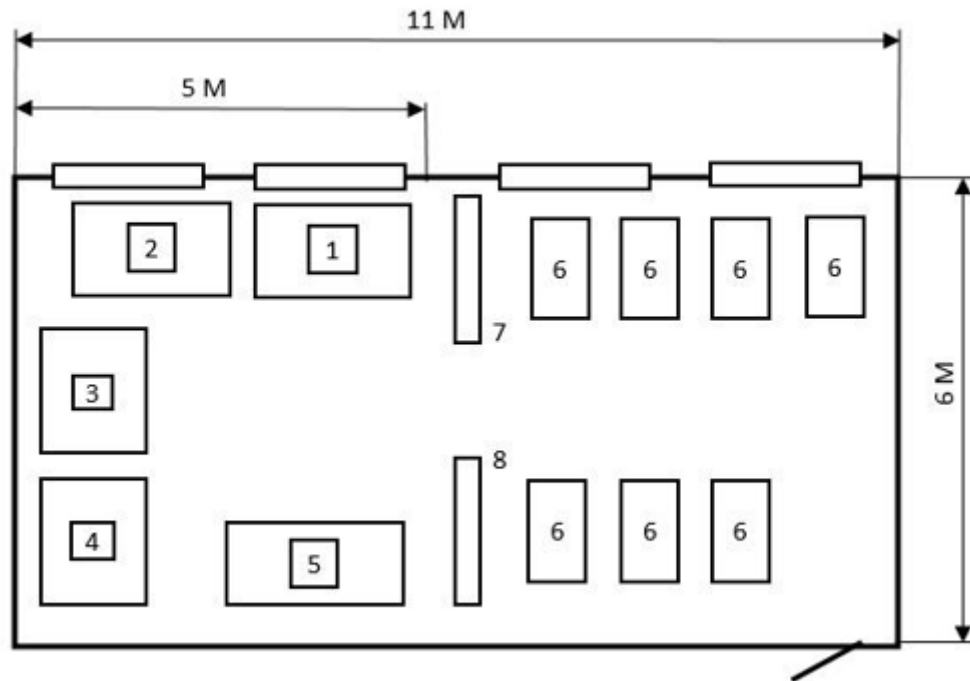
Важливою частиною організації виробничого процесу на підприємствах є охорона праці. Охорона праці представляє собою систему законодавчих актів, яким відповідають соціально-економічні, технічні, санітарно-гігієнічні та організаційні заходи, основним завданням яких є забезпечення захисту робітників від можливих небезпек, збереження їх здоров'я і працездатності в процесі трудової діяльності [52]. Право людини на безпеку праці гарантовано Конституцією України.

Метою розділу охорони праці є аналіз небезпечних та шкідливих факторів, визначення можливих загроз, а також способів їх запобігання при виконанні науково-дослідної роботи. У цій роботі досліджується вплив термічної обробки на структуру та властивості сплавів з пам'яттю форми на основі міді.

5.1 Аналіз параметрів приміщення

Науково-дослідницька робота виконувалась на кафедрі “Фізичного матеріалознавства та термічної обробки” в лабораторії електронографії (кімната 511, 9 корпус, 5 поверх). Схематичне зображення лабораторії, а також розташування всіх елементів продемонстровано на рисунку 5.1.

Після проведення вимірювань приміщення отримані наступні результати: розміри лабораторії: ширина – 6 м, довжина – 11 м, висота – 3 м. Площа приміщення становить 66 м^2 , об'єм 198 м^3 . Розміри вікон: ширина – 2 м, висота – 1,8 м. В лабораторії працює 3 людини, отже площа, яка приходить на одну людину становить – 22 м^2 , а об'єм – 66 м^3 . Отримані показники відповідають нормам ДсанПН 3.32 - 007 – 98, згідно яким, на одну людину повинно приходитись не менше 6 м^2 площі та 20 м^3 об'єму [53].



1 – оптичний мікроскоп; 2 – комп'ютер; 3 – оптичний мікроскоп;
 4 – мікротвердомір ПМТ-3М; 5 – чотириохзондовий резистометр; 6 – партя;
 7 – шафа з документами; 8 – шафа з матеріалами.

Рисунок 5.1 – Схема лабораторії електронографії

5.2 Мікроклімат робочої зони

Якість повітря робочої зони є дуже важливою під час виконання будь якої роботи, адже від неї залежить здоров'я працівника та його продуктивність. Саме тому стан повітря робочої зони повинен постійно контролюватись та відповідати санітарним нормам мікроклімату виробничих приміщень згідно ДСН 3.3.6.042-99. Для дослідження мікроклімату робочої зони необхідно дізнатися наступні параметри: температуру повітря ($^{\circ}\text{C}$), відносну вологість повітря (%), швидкість руху повітря (м/с), та порівняти ці параметри із оптимальними відповідно до пори року та категорії важкості роботи [54].

Роботу, що проводилась в приміщенні лабораторії можна віднести до категорії важкості – Іб. Ця категорія означає виконання легкої фізичної роботи із затратами енергії організму до 150 ккал/год [54].

Параметри мікроклімату робочої зони кімнати 511 наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату для категорії роботи Іб

Період року	Температура, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Допустима для холодного періоду	17 – 25	75	0,2
Данні вимірювань	21	70	0,1
Допустима для теплого періоду	19 – 27	60	0,3
Данні вимірювань	22	55	0,2
Висновки	Задовольняє вимогам	Задовольняє вимогам	Задовольняє вимогам

Виходячи з отриманих результатів вимірювання мікроклімату, робоча зона приміщення, в якому проводиться науково-дослідна робота задовольняє вимоги до якості повітря і є безпечною для роботи.

5.3 Аналіз освітленості приміщення

Правильне освітлення робочої зони є дуже важливим для забезпечення гарних робочих умов, воно позитивно впливає на концентрацію та здоров'я працівників. Освітлення може бути штучним – створеним електричними джерелами, або суміщеним, коли недостатнє природнє освітлення доповнюють штучним.

У лабораторії використовується суміщене освітлення, природнє доповнене штучним. Природнє бокове освітлення забезпечується віконними прорізами, які виходять на північ, відстань від вікна до основної робочої зони складає 3 м. Для

забезпечення загального штучного освітлення використовуються люмінесцентні лампи ЛБ-40 в кількості 24 штук. Так як розмір деяких зразків не перевищує декількох мм, то виконувани в лабораторії роботи можна віднести до роботи високої точності (восьмий розряд зорових робіт).

Недостатнє та надмірне освітлення та його нерівномірність призводять до втоми очей, зниження продуктивності робітника, можуть викликати головний біль, та призвести до розладу зору.

5.4 Організація робочого місця

Організація робочого місця представляє собою систему заходів із забезпечення працівника просторовою зоною, оснащеною необхідними засобами праці, для виконання певної роботи [54]. Для забезпечення максимальної продуктивності та збереження здоров'я працівника дотримуються норм організації праці виходячи із ДСанПіН 3.3.2.007-98 та НПАОП 0.00-1.28-10.

В залежності від виду роботи обирається робоча поза (вільна, стоячи чи сидячи), за якою організовується робочий графік працівника та робоча зона для нього.

Основна частина виконання науково-дослідної роботи проходить за комп'ютер, тому обрана робоча поза сидячи.

Робоче місце користувача ПК повинно забезпечувати оптимальні параметри для виконання роботи: висота робочої поверхні столу для комп'ютера повинна бути в межах (680 – 900) мм, а ширина – 1000 мм – 1500 мм. Глибина столу має складати 700 мм – 1000 мм. Робочий стіл може бути обладнаний підставкою для ніг шириною не менше 300 мм та глибиною не менше 400 мм. Якщо підставка відсутня, то місце для ніг повинно відповідати наступним параметрам висота – 600 мм, ширина – 500 мм, глибина – (450 – 650) мм. Відстань від очей до монітору ПК – (400 – 600) мм, клавіатура на відстані 300 мм від краю столу, коефіцієнт відбиття поверхні робочого столу – 0,6 [52, 56].

Організація робочих місць у кабінеті 511 (лабораторії електронографії)

відповідає всім нормам і забезпечує оптимальні умови для виконання науково-дослідної роботи.

5.5 Виявлення і аналіз наявності шуму

Шум – це сукупність звуків різноманітної частоти та інтенсивності, що виникають в результаті коливання частинок у пружному середовищі. Тривала дія шуму має негативний вплив на нервову систему та на слух людини, та може спричинити емоційне та психологічне виснаження. Поріг больової чутливості для людини складає 120 дБА.

У лабораторії присутня витяжна шафа, яка використовується при травленні зразків. Шум від цього устаткування не перевищує допустимий рівень, згідно з ДСН 3.3.6.037-99 [57].

Частина науково-дослідницька робота виконувалась в лабораторії, де присутній пристрій ВУП-5М, від якого йде певний шум під час його роботи. Це устаткування не перевищує допустимий рівень шуму при роботі, згідно з ДСН 3.3.6.037-99 [57], тому не виробляє до виникнення профзахворювань.

В ході виконання науково-дослідної роботи рівень шуму всіх устаткувань відповідав нормам ДСН 3.3.6.037-99 і не був перевищений, за рахунок чого не мав негативного впливу на здоров'я виконавців досліджень.

5.6 Виробниче випромінювання

Дані про виробничі випромінювання нормовані за документом: "Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) [58].

Виконання науково-дослідної роботи передбачає використання комп'ютера (ЕОМ).

При роботі з ЕОМ виникає небезпека впливу на організм людини: ультрафіолетового випромінювання, електростатичного поля та невикористаного рентгенівського випромінювання. Також під час роботи з комп'ютером виникає

велике навантаження на очі.

Для запобігання соматичних та генетичних наслідків від випромінення, відповідно до ДСП 6.177-2005-09-02 [59], для радіоелектронної апаратури встановлені норми потужності експозиційної дози рентгенівського випромінювання, воно не повинно перевищувати $2,78 \cdot 10^{-12}$ мкР/с (100 мкР/год) при умові, що оператор знаходиться на відстані 5 см від зовнішньої поверхні пристрою.

Так як для значної частини роботи необхідно використання ЕОМ, то час роботи за комп'ютером не має перевищувати 4 години за робочу зміну.

5.7 Безпека при роботі з електричними приладами

Електробезпека представляє собою сукупність заходів, направлених на забезпечення захисту робітників від небезпеки пов'язаної з електричним струмом.

Основна задача електробезпеки це запобігання, або хоча б мінімізація негативного впливу електричного струму на людину.

На дію електричного ураження впливають наступні фактори: величина струму (1 мА); тип струму (струм перемінний); частота струму (50 Гц); тривалість дії струму, стан організму людини, виробниче середовище.

Категорія приміщення визначається за наявністю в приміщенні чинників, через які можливо отримати електротравми. До таких чинників відносяться [60]:

- температура в приміщенні вище 35 °С;
- відносна вологість вище 75 %;
- підлога, що проводить струм — металева, бетонна, цегляна;
- можливість одночасного доторкання до неструмовідних частин приладів чи струмопровідних конструкцій.

Під час виконання науково-дослідної роботи небезпека ураження електричним струмом можлива від ЕОМ, яка використовується для обробки результатів, та від установки ВУП-5М.

Кімната, в якій виконувалася робота, відноситься до класу І - правильно проведене захисне заземлення корпусів та приладів. Робочі місця розташовані

таким чином, щоб виключити можливість одночасного доторкання до корпусів, електроустаткування і приладів. Прилад ВУП-5 живиться від мережі 220 В.

5.8 Пожежна безпека

Відповідно до НАПБ Б.03.002-2007 [61] приміщення лабораторії 511-9 за пожежонебезпекою належить до категорії «В» (в лабораторії присутні горючі та важко горючі рідини та тверді речовини). Найбільш пожежонебезпечним місцем в приміщенні є місця прокладки електропроводки, та місце розташування ЕОМ. Причиною загорання може бути коротке замикання в електропроводці.

Засобом пожежогасіння у лабораторії є вуглекислотний вогнегасники ВВК-1,4. Використання вогнегасників такого типу можливе якщо напруга на приладах, в разі виникнення пожежі, не перевищує 1000 В. Для оповіщення в разі виникнення пожежі в лабораторії розміщені датчики-сигналізатори, які реагують на підвищення температури. При виникненні пожежі всі працівники повинні евакуюватися із приміщення шляхом, вказаним на плані евакуації (рисунок 5.1).

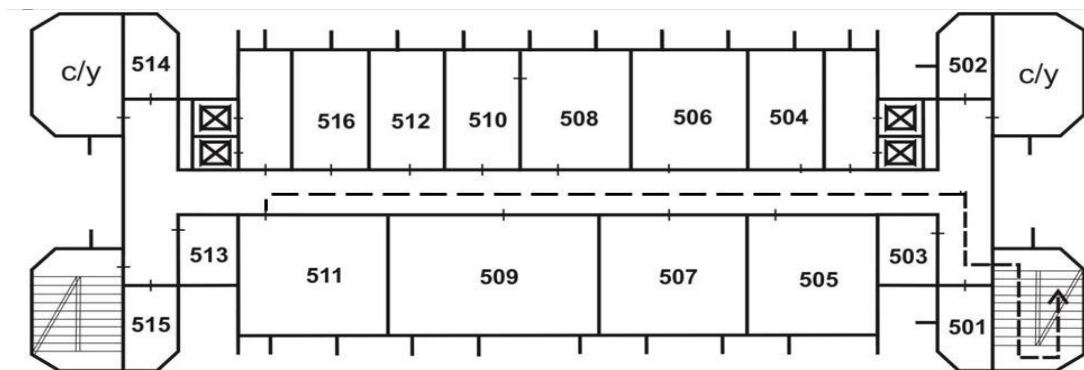


Рисунок 5.1 – План евакуації із лабораторії № 511

5.9 Висновки до розділу 5

1. Проведений аналіз шкідливих та небезпечних факторів, які можуть виникнути в ході виконання даної науково-дослідної роботи. Визначено заходи для

уникнення травмувань виконавців досліджень на всіх етапах проведення.

2. Виявлено, що для отримання необхідної освітленості робочої ділянки застосовується суміщене освітлення, адже для створення прийнятних умов для виконання роботи лише природнього не достатньо.

3. Мікроклімат, освітлення та рівень організації робочого місця відповідають всім необхідним умовам та санітарним нормам, а рівні шуму та випромінення не перевищують норм, тому всі умови є сприятливими для виконання науково-дослідної роботи.

ВИСНОВКИ

1. В роботі встановлено, що хімічний склад та термічна обробка (загартування і відпал) впливають на структуру, фазовий склад, механічні і функціональні властивості та температуру протікання мартенситного перетворення. Додавання 1 % Fe в якості легуючого елемента призводить до підвищення температури протікання мартенситного перетворення вище кімнатної. Крім того, встановлено, що легування сприяє росту зерна до 5 мкм, завдяки чому сплав отримує кращі показники пам'яті форми.

2. Встановлено, що відпал сприяє виділенню феромагнітної β_3 -фази Cu_2AlMn при старінні пересиченого твердого розчину Al і Mn в Cu (загартованої β -фази). Низька інтенсивність рефлексів і сильне розмиття дифракційних піків свідчить про те, що виділення β_3 -фази є нанодисперсним. Після загартування зразків сплаву виділень феромагнітної β_3 -фази на дифрактограмі не спостерігається. Мікротвердість відпалених сплавів нижча, ніж тих, які піддавалися гартуванню, це пов'язано як з режимом термічної обробки так і з різною концентрацією легуючих елементів в сплавах. Різниця в мікротвердості сплавів складає близько 10 %.

3. Розраховано планову кошторисну вартість науково-дослідної роботи, вона становить 75961,43 грн. Підрахувавши коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи отримали значення 1,395, яке є більшим за одиницю. Виходячи з цього зрозуміло, що проведення даного дослідження є доцільним та ефективним з економічної точки зору.

4. В приміщенні лабораторії № 511-9, в якому проводилися дослідження до даної дипломної роботи забезпечені підходящі умови мікроклімату, освітлення. Рівень організації робочого місця відповідає всім необхідним умовам та санітарним нормам. Рівні шуму та випромінення знаходяться в межах норми.

CONCLUSIONS

1. It's established that the chemical composition and heat treatment (hardening and annealing) affect the structure, phase composition, mechanical and functional properties and temperature of the martensitic transformation. The addition of 1% Fe as an alloying element leads to increase the temperature of the martensitic transformation above room temperature. In addition, it has been found that alloying promotes grain growth of up to 5 mm, which gives the alloy better shape memory.

2. It is established that annealing promotes the release of ferromagnetic β_3 -phase Cu₂AlMn during aging of supersaturated solid solution of Al and Mn in Cu (hardened β -phase). Low intensity of reflexes and strong blurring of diffraction peaks indicate that the release of β_3 -phase is nanodispersed. After quenching of the alloy samples, no ferromagnetic β_3 phase emissions are observed on the diffraction pattern. The microhardness of annealed alloys is lower than that of hardened alloys, this is due to both the heat treatment mode and the different concentration of alloying elements in the alloys. The difference in the microhardness of the alloys is about 10%.

3. The planned estimated cost of research work is calculated, it is UAH 75961.43. By calculating the coefficient of conditional economic efficiency of research work, we obtained a value of 1,395, which is bigger than one. Based on this, it is clear that this study is appropriate and cost-effective.

4. Appropriate microclimate and lighting conditions are provided in the laboratory № 511-9, where the research for this diploma project was conducted. The level of organization of the workplace meets all the necessary conditions and sanitary norms. Noise and radiation levels are within normal limits.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ДЖЕРЕЛ

1. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_material. – Дата доступа: 06.05.2022. – Smart material.
2. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов / Г.А. Молодцов, В.Е. Биткин, В.Ф. Симонов, Ф.Ф. Урмансов. // М.: Машиностроение. – 2000. – 352 с.
3. Ma J. High temperature shape memory alloys / J. Ma, I. Karaman, R.D. Noebe // Int. Mater. Rev. – 55 (5). – 2010. – P. – 257–315.
4. Лихачев В. А. Эффект памяти формы / В. А. Лихачев, С. Л. Кузьмин, З. П. Каменцева. — Л.: Изд-во ЛГУ. – 1987.
5. Лихачёв В.А. Эффект памяти формы / В.А. Лихачев.// Соросовский образовательный журнал. – №3. – 1997. – 107-114 с.
6. Эстрин Э.И. Мартенситные превращения / Э.И. Эстрин, В.А. Лободюк. // М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2009. – 352 с.
7. Сверхупругость и эффект памяти формы. Режим доступа: https://ozlib.com/824834/tehnika/sverhuprugost_effekt_pamyati_formy. – Дата доступа: 10.05.2022.
8. Бхавсар Р. Новые интеллектуальные материалы / Р. Бхавсар, И. Нитин, П. Вайдья // Нефтегазовое обозрение. – 2008. – 38 – 49 с.
9. Дударев Е.Ф. Локализация мартенситной деформации на мезо- и макромасштабном уровнях в крупнозернистом и субмикрористаллическом сплавах с памятью формы / Е.Ф. Дударев, Г.П. Колобов, Г.П. Бакач Г.П.// Физическая мезомеханика. – 7, спец. выпуск, Ч.1, – 2004.
10. Ооцука К. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука, К. Симидзу, Ю. Судзуки; под ред Фунакубо Х. // М.: Metallurgia. – 1990. – 220 с.
11. Лахтин Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева // М.: Машиностроение. – 1990. — 528 с.
12. Применение сплавов с памятью формы в медицине / Г. С. Маринский, А. В. Чернец, Н. А. Четвертко, А. Г. Дубко. – 2012. – 54-59 с.

13. Никель. Какой вред для здоровья несет никель и его соединения? Режим доступа:

<https://xlom.ru/interesno/professionalnye-zabolevaniya/nikel-kakoj-vred-dlya-zdorovya-neset-nikel-i-ego-soedineniya>. – Дата доступа: 12.05.2022.

14. A look into Cu-based shape memory alloys: Present scenario and future prospects. Режим доступа: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-materials-research/article/abs/look-into-cubased-shape-memory-alloys-present-scenario-and-future-prospects/F870DE050EFB67ADF1D930067ACC71A7#access-block>. – Дата доступа: 12.05.2022.

15. Кокорин В. В. Влияние повторных мартенситных превращений на свойства сплава с памятью формы Cu-Al-Mn / В. В. Кокорин, И. А. Осипенко, Т. В. Ширина // Физ. мет. Металловед –53 – №4. – 1982. – 732 с.

16. Варлимонт Х. Мартенситные превращения в сплавах на основе меди, серебра и золота / Х. Варлимонт, Л. Дилей. // Москва: Наука. – 1980.

17. Арбузова И. А. Оптимизация термообработки сплавов с ЭПФ на основе Cu, Al, Mn / И. А. Арбузова, Л. В. Титов, Л. А. Хандрос // Металлофизика. – 69. – 1977. – 83 с.

18. Банных О.А. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа / О. А. Банных, П.Б. Будберг П.Б, С. П. Алисова. // Металлургия. – 1986.

19. Шухардина С.В. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди / С.В. Шухардина. // Наука. – 1979.

20. Лякишева Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Н.П. Лякишева. // Машиностроение. – 1996-2000.

21. Miyazaki S. Iron Steel Inst / S. Miyazaki, K. Otsuka // Jpn Int. – 29. – 1989. – P. – 353-377 p.

22. Tadaki T. Shape memory materials / T. Tadaki, K. Otsuka, C. M. Wayman // Cambridge University Press. – 1998. – P. – 97–116.

23. Kainuma R Thermoelastic martensite and shape memory effect in ductile Cu-Al-Mn alloys / R. Kainuma, S. Takahashi, K. Ishida // *Metall. Mater. Trans.* – 27A. – 1996. – P. – 2187-2195.
24. Sutou Y. Enhancement of superelasticity in Cu-Al-Mn-Ni shape-memory alloys by texture control / Y. Sutou, R. Kainuma, K. Ishida // *Mater. Sci. Eng.* – A275. – 1999. – P. – 375-379.
25. Superplasticity of Cu-Al-Mn-Ni Shape Memory Alloy / T. Omori, J. J. Wang, Y. Sutou et al // *Mater. Trans.* – 432002. – P. – 1676-1683.
26. *Acta Mater.* / Y. Sutou, T. Omori, K. Yamauchi et al // Volume. – 53, Issue – 15. – 2005. – P. – 4121-4133.
27. Sure G. N. Preparation and properties of fine grain β -CuAlNi strain - memory alloys / G. N. Sure, L. C. Brown // *Metall. Trans.* – 15A. – 1984. – P. – 1613-1621.
28. Development of medical guide wire of Cu-Al-Mn–base superelastic alloy with functionally graded characteristics / Y. Sutou, T. Omori, A. Furukawa et al // *Biomed Mater. Res. Part B: Appl Biomater.* – 69B. – 2004 – P. – 64-68.
29. Superelastic effect in polycrystalline ferrous alloys, / T. Omori, K. Ando, M. Okano et al // *Science* 333. – 2011 – P. – 68-71.
30. Large recovery strain in Fe-Mn-Si-based shape memory steels obtained by engineering annealing twin boundaries / Y.H. Wen, H.B. Peng, D. Raabe et al // *Nat. Commun.* – 5. – 2014. – 4964 p.
31. Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview / A. Cladera, B. Weber, C. Leinenbach et al // *Const. Build. Mater.* – 63. – 2014. – P. – 281-293.
32. Ozbulut O.E. Seismic Response Control Using Shape Memory Alloys / O.E. Ozbulut, S. Hurlbaeus, R. Desroches // *Review Mater. Sys. Struct.* – 22. – 2011. – P. – 1531-1549.
33. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities / J.M. Jani, M. Leary, A. Subic, M.A. Gibson // *Mater. Design.* – 56. – 2014. – P. – 1078-1113.
34. Polycrystalline shape-memory alloy showing huge superelasticity, / Y. Tanaka, Y. Himuro, R. Kainuma et al // *Science.* – 327. – 2010. – P. – 1488-1490.

35. Unusual reversible twinning modes and giant superelastic strains in FeNiCoAlNb single crystals, / Y.I. Chumlyakov, I.V. Kireeva, O.A. Kutz et al // Scripta Mater. – 119. – 2016. – P – .43-46.

36. The effect of nanoprecipitates on the superelastic properties of FeNiCoAlTa shape memory alloy single crystals, / J. Ma, B.C. Hornbuckle, I. Karaman et al // Acta Mater. – 61. – 2013. – P. – 3445-3455.

37. Enhanced mechanical properties of polycrystalline Cu-Al-Ni alloy through grain boundary orientation and composition control, / H. Fu, S. Song, L. Zhuo et al // Mater. Sci. Eng. A. – 650. – 2016. – P. – 218-224.

38. Liu J. L. Superelastic anisotropy characteristics of columnar-grained Cu-Al-Mn shape memory alloys and it's potential applications, / J.L. Liu, H.Y. Huang, J.X. Xie // Mater. Design. – 85. – 2015. – P. – 211-220.

39. Effect of grain size and texture on pseudoelasticity in Cu-Al-Mn-based shape memory wire, / Y. Sutou, T. Omori, K. Yamauchi et al // Acta Mater. – 53. – 2005. – P. – 4121-4133.

40. Ueland S.M. Superelasticity and fatigue in oligocrystalline shape memory alloy microwires, / S.M. Ueland, C.A. Schuh // Acta Mater. – 60. – 2011. – P. – 282-292.

41. Perkins Ed. J. Thermomechanical Characteristics of Alloys Exhibiting Martensitic Thermoelasticity, in Shape memory effects in alloys / Ed. J. Perkins // Plenum Press. – New York. – 1975. – P. – 273-303.

42. Structural Features of Martensitic Transformations in Shape Memory Ferromagnetic Fe-Ni-Co-Ti Alloys” / L. Kozlova, A. Titenko, L. Demchenko et al // 2019 IEEE 9th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties. – 2020. – 01MIT10-1-01MIT10-3.

43. The Influence of Thermomechanical Treatment on the Strain Behavior of the Fe–Ni–Co–Ti Ferromagnetic Alloy Nanocomposite with Shape Memory Effect/ A. Titenko, L. Demchenko, M. Babanli, et al // Powder Metall Met Ceram, vol. – 59. – 2020. – P. – 271-281.

44. Chowdhury P. On deformation of Fe-Mn based structural alloys / P. Chowdhury, D. Canadinc, H. Sehitoglu // *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. – 122. – 2017. – P. – 1-28.

45. Maruyama T. Innovation in producing crane rail fishplate using Fe–Mn–Si–Cr based shape memory alloy. / T. Maruyama, T. Kurita, S. Kozaki // *Mater Sci Technol.* – 2008.

46. Shape memory and superelastic alloys: technologies and applications, / T. Maruyama, H. Kubo, K. Yamauchi et al // Cambridge: Woodhead Publishing Limited; Chapter – 12. – 2011. – P. – 59-141.

47. Металлографический анализ. Режим доступа: <https://thixomet.ru/metallograficheskiy-analiz/>. – Дата доступа: 16.05.2022.

48. Холявко В. В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів :– Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / В. В. Холявко, І. А. Владимирський, О. Жабинська // навчальний посібник для студентів галузі знань 13 – Київ: Центр учбової літератури. – 2016. – 156 с.

49. Тітенко А. М. Вплив відпалу у магнітному полі на формування системи феромагнітних частинок в сплаві Cu-Al- Mn з індукованим мартенсним перетворенням / А. М. Тітенко, Л. Д. Демченко, Я. А. Тітенко // *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра.* – К.: НТУУ «КПІ», – 2015. – 1123 с.

50. Fabrication of two-dimensional assembly of L10 FePt nanoparticles / O. A. Ivanov, L. V. Solina, V. A. Demshina, L. M. Maget // *Phys. Met. Metallogr.* – 35. – 81 – 1973.

51. Шеин Е. А. Устройство и принцип работы рентгеновского дифрактометра общего назначения. Фазовый анализ: методические указания к лабораторной работе / Е. А. Шеин // Оренбург: Оренбургский гос. ун-т. – ОГУ. – 2013. – 26 с.

52. 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.

53. ДСанПіН 3.3.2.007-98 – Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) електронно-обчислювальних машин.

54. 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 дані (1 файл: 26,1 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – 337 с.

55. НПАОП 0.00-1.28-10 – Правила охорони праці під час експлуатації ЕОМ.

56. ДСН 3.3.6.037-99. – Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

57. НРБУ-97 – Норми радіаційної безпеки України. Розробник: Міністерство охорони здоров'я України, Комітет з питань гігієнічного регламентування, Національна комісія з радіаційного захисту населення України. Затверджено: Міністерство охорони здоров'я України, наказ від 14.07.1997 р. № 208. Введені в дію Постановою Головного державного санітарного лікаря України Першого заступника міністра охорони здоров'я 77 України від 01.12.1997 р. № 62 з доповненням: ДГН 6.6.1- 6.5.061-2000 Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000).

58. ДСП 6.177-2005-09-02 – Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України.– [Чинний від 2005-02-02].

59. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. канд. техн. наук, доцента В. Ц. Жидецького // Львів: Афіша. – 2000. – 32 с.

60. НАПБ Б.03.002-2007 – Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.