

ДРОГОБИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА
Кафедра технологічної та професійної освіти

Юрій ПАВЛОВСЬКИЙ
Володимир ПОПОВИЧ
Мирослав ПАГУТА

Сучасні матеріали в техніці: інтелектуальні
матеріали з ефектом пам'яті форми

Навчально-методичний посібник

Дрогобич
2025

*Рекомендовано до друку вченою радою
Дрогобицького державного педагогічного університету
імені Івана Франка (протокол № 1 від 23 січня 2025 р.)*

Рецензенти:

Кузик О.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка;

Лужецький В.С. – кандидат технічних наук, доцент, директор Меденицького аграрно-технологічного професійного коледжу.

Відповідальний за випуск:

Нищак І.Д. – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри технологічної та професійної освіти Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка.

Павловський Ю.В., Попович В.Д., Пагута М.В.

П12 Сучасні матеріали в техніці: інтелектуальні матеріали з ефектом пам'яті форми : навчально-методичний посібник для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти. Дрогобич: Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, 2025. 58 с.

Навчально-методичний посібник містить короткі теоретичні відомості, практичні роботи, питання для самоконтролю, завдання для закріплення і перевірки знань та рекомендовану літературу з окремих розділів дисципліни «Сучасні матеріали в техніці».

Посібник призначений для студентів закладів вищої освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти, які навчаються за спеціальністю 014 Середня освіта (Технології).

Бібліографія – 32 назви.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З ЕФЕКТОМ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ.....	5
1.1. Загальні уявлення про матеріали з пам'яттю форми.....	5
1.1.1. Історія відкриття ефекту пам'яті форми	5
1.1.2. Основні поняття про матеріали з пам'яттю форми	6
1.2. Особливості прояву ефекту пам'яті форми у сплавах із впорядкованою та невпорядкованою структурою	11
1.2.1. Структура та властивості сплавів на основі нікеліду титану	10
1.2.2. Особливості технології одержання злитків та деформованих напівфабрикатів сплавів на основі TiNi	13
1.2.3. Особливості структури та властивостей сплавів на основі міді.....	17
1.2.4. Сплави на основі титану	19
1.2.5. Сплави на основі заліза та марганцю.....	20
1.3. Основні напрями застосування функціональних матеріалів з пам'яттю форми у техніці та медицині	22
1.3.1. Особливості застосування пристроїв з ефектом пам'яті форми	22
1.3.2. Трансформуючі конструкції.....	23
1.3.3. Термомеханічні з'єднання	24
1.3.4. Термосилові виконавчі елементи	26
1.3.5. Температурні датчики та терморегулятори.....	28
1.3.6. Теплові двигуни.....	30
1.3.7. Медичні імплантати та інструменти	32
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИВЧЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЕФЕКТОМ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ	37
2.1. Практичне заняття «Дослідження матеріалів з пам'яттю форми»	37
2.2. Практичне заняття «Дослідження термодеоформаційних кривих ε - T сплаву з ефектом пам'яті форми».....	40
2.3. Завдання для самоконтролю та закріплення знань.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	55
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	57

ВСТУП

Створення нових матеріалів та технологій їх виробництва завжди було одним із важливих наукових та прикладних завдань фізичного матеріалознавства. Переважна більшість металевих і неметалевих матеріалів, призначених для різних сфер діяльності людини, використовуються як конструкційні для виготовлення різних деталей та обладнання загального і спеціального призначення. Іншою групою матеріалів, призначення і застосування яких в основному визначається їхніми особливими та часом унікальними фізико-технічними характеристиками, є так звані функціональні матеріали. До них відносять різні матеріали зі спеціальними властивостями (електричними, магнітними, хімічними тощо) для техніки, медицини та інших галузей використання.

Яскравим представником функціональних та водночас конструкційних матеріалів є металеві сплави з ефектами пам'яті форми. Матеріали з пам'яттю форми (МПФ) здатні за низьких температур при навантаженні накопичувати деформацію, а після нагрівання повністю або частково її відновлювати. До таких матеріалів відносять насамперед сплави, в яких при термічному та/або механічному впливі розвиваються зворотні мартенситні перетворення. Ці сплави можуть бути основою композиційних матеріалів, більшою чи меншою мірою здатних до відновлення форми.

Подібне явище зміни форми спостерігається і в полімерних матеріалах. Однак природа формозміни в них та умови його створення та реалізації значно відрізняється від сплавів із пам'яттю форми.

Інтерес до матеріалів з ефектом пам'яті форми впродовж останніх десятиліть змінювався від злету до падіння і знову – до злету. Сьогодні вони затребувані у багатьох галузях економіки. Їх почали широко використовувати у медицині, електроніці та товарах народного споживання. Саме тому виникла потреба розробки навчально-методичних матеріалів, які інтегрують знання з різних наук про інтелектуальні матеріали з пам'яттю форми в єдине ціле.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З ЕФЕКТОМ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ

1.1. Загальні уявлення про матеріали з пам'яттю форми

1.1.1. Історія відкриття ефекту пам'яті форми

Першу згадку про незвичайну поведінку матеріалу можна віднести до 1932 року, коли на всесвітній технічній виставці у Брюсселі шведським дослідником А. Оландером був продемонстрований стрижень зі сплаву золота з кадмієм, який під дією прикріпленого до кінця вантажу вигинається при охолодженні, а під час нагрівання випрямлявся і піднімав цей вантаж.

Але справжній інтерес до матеріалів з ефектом пам'яті форми (МПФ) виник після повідомлення на одній з наукових конференцій у 1962 році. У Бюгером і Ф. Вангом про відкритий ними матеріал, який виявляє пам'ять форми. Ці вчені працювали у військово-морській артилерійській лабораторії (Naval Ordnance Laboratory) і при вивченні жаростійкості та жароміцності сплавів системи Ti-Ni звернули увагу, що при еквіатомному складі (50 ат.% Ti + 50 ат. % Ni) матеріал в охолодженому стані здатен накопичити значну деформацію, а при наступному нагріванні повністю її відновити, тобто повернутися до первісної форми. Вони назвали матеріал «нітінол» за позначенням елементів, які входять до нього, та аббревіатурою лабораторії, в якій вони працювали. У 1965 році склад та назва сплаву були запатентовані [1].

З цього моменту почалися інтенсивні дослідження нітінолу та пошуки його застосування. Одним із перших прикладів серійного виробництва і застосування МПФ стали муфти для термомеханічних з'єднань трубопроводів. Американська фірма Raychem розробила й виробляє муфти, які при температурі рідкого азоту деформують для збільшення внутрішнього діаметра та вводять у них кінці труб. Після відігрівання до нормальної температури муфти прагнуть повернутися до попереднього розміру та надійно з'єднують кінці труб. Такі сполуки застосовувалися на палубному винищувачі-перехоплювачі F-14 Tomcat. На кожному з таких літаків (а їх було понад тисячу)

стояло близько 800 муфт, і за 30 років експлуатації не було зафіксовано жодного випадку руйнування з'єднання [2].

У всьому світі було подано кілька десятків тисяч заявок на винаходи, у яких основним елементом був матеріал із пам'яттю форми. Практично всі винаходи отримали патенти, але кілька десятків з них могли бути реально використані. Матеріал був настільки примхливим, що змусити його працювати так, як треба розробнику конструкції, вдавалося вкрай рідко. Тому первісна ейфорія відкриття змінилася песимізмом. У 80–90-х роках про нього почали забувати, але в цей період матеріал «перейшов» з-під опіки винахідників-конструкторів до матеріалознавців-технологів. У процесі довгих і копітких досліджень, чергуванні удач і невдач, вони навчилися, певною мірою, керувати структурою та властивостями цих матеріалів та забезпечувати більшість вимог винахідників-конструкторів і виробників-бізнесменів.

Матеріал із пам'яттю форми знову став затребуваний у багатьох галузях економіки та інтерес до нього з початком нового століття знову зріс. Він почав широко використовуватися у медицині та товарах народного споживання. Якщо ми бачимо людину з брекетами для виправлення прикусу зубів, то, найімовірніше у неї силовий елемент, який забезпечує плавне, нетравматичне зміщення зубів, виконаний із надпружного дроту сплаву на основі нікеліду титану (рис. 1.1, а). Такий дріт використовується в оправі окулярів (рис. 1.1, б) або в гнучких рибальських повідцях для спінінга (рис. 1.1, в).



а)



б)



в)

Рис. 1.1. Приклади практичного застосування матеріалів з пам'яттю форми

1.1.2. Основні поняття про матеріали з пам'яттю форми

Однією зі складнощів роботи з МПФ є те, що досі не створено загальновизнаної термінології, яка дає змогу описати весь комплекс явищ, пов'язаних із пам'яттю форми, та визначити їх характеристики. Це ускладнює правильну оцінку результатів досліджень різних науковців і проєктування нових виробів із необхідними

характеристиками працездатності. Споживачі матеріалу не знають, які характеристики вимагати від виробників, а виробники не знають, що потрібно споживачам. Для подолання цієї перешкоди необхідна добра воля наукової та технічної спільноти, щоб не триматися кожному за придумані формулювання, а дійти єдності, зумовленої бажанням розвивати цей науковий та практичний напрям.

Щоб описати більш-менш загальноприйняті поняття у галузі матеріалів з пам'яттю форми, необхідно зробити невеликий відступ, тісно пов'язаний з вищевикладеними думками. Це стосується понять мартенситу та мартенситного перетворення, які є основними у визначенні явища ефекту пам'яті форми.

Поняття «мартенсит» було введене для описання структури загартованих вуглецевих сталей. Спочатку воно трактувалося як дрібногочаста структура, яка спостерігається в оптичному мікроскопі на зразках і виробах зі сталі, охолоджених з високою швидкістю у воді або оливі від високих температур. Назву ця структура отримала від прізвища німецького вченого А. Мартенса, який одним із перших її вивчив та описав. Потім поняття мартенситу було уточнене як «пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі». Оскільки утворення мартенситу різко змінювало властивості сталі, то механізм його формування інтенсивно вивчали, що призвело до створення теорії мартенситного перетворення як бездифузійного зсувного перетворення, у процесі якого сусідні атоми не змінюють своїх сусідів при переході з високотемпературної у низькотемпературну кристалічну структуру [3].

У процесі розвитку наукових знань про мартенситне перетворення було показано, що воно властиве практично всім поліморфним металам, багатьом інтерметалідам та величезній кількості сплавів. Розроблена теорія мартенситного перетворення дуже добре описувала явища, які спостерігалися у цих матеріалах. Але поступово з'ясувалося, що повністю прикласти цю теорію до вуглецевих сталей дуже складно, оскільки атоми вуглецю у кристалічній ґратці заліза залишаються досить рухливими навіть за великих швидкостей охолодження, що не дає змоги забезпечити головну ознаку мартенситного перетворення – бездифузійність. У результаті, за сучасною теорією мартенситних перетворень, у вуглецевих сталях немає мартенситного перетворення, натомість спостерігається дифузійно-корпоративний перехід. Тому в науковій літературі є зовсім різні формулювання понять мартенситу і мартенситних перетворень, що суперечать одне одному. Все залежить

від того, за якими підручниками навчався дослідник чи до якої наукової школи належить.

Отже, ефект пам'яті форми проявляється у процесі оборотного мартенситного перетворення. Уявімо, що високотемпературна фаза матеріалу має кубічну ґратку, яка на схемі рис. 1.2 показана квадратами. Зазвичай цю фазу називають аустенітом (не треба плутати з твердим розчином вуглецю у γ -залізі). Якщо матеріал з такою структурою піддається деформації при температурах значно вищих від температури перетворення, його формозміна відбувається за пружним механізмом, доки не буде досягнуто напруження ковзання. Після цього утворення та рух дислокацій незворотно змінює форму кристала (рис. 1.2, *схема 1*). Після розвантаження та наступного нагрівання змінена форма зберігається [4].

При охолодженні кристала нижче температури M_n починається, а нижче M_s закінчується перетворення аустеніту на мартенсит, кристалічну ґратку якого на схемі представлено паралелограмами (рис. 1.2, *схема 3*). Оскільки кристал аустеніту перетворюється на кристал мартенситу серед інших таких самих кристалів, його макроформа неспроможна суттєво змінитися. Через це кристал мартенситу піддається додатковій акомодативній деформації ковзанням (рис. 1.2, *схема 3а*) або двійникуванню (рис. 1.2, *схема 3б*), щоб зберегти макроформу, яку мав при високих температурах кристал аустеніту. Для забезпечення повного повернення деформації при реалізації ЕПФ необхідно, щоб усі деформаційні процеси були механічно зворотні, що передбачає відсутність дислокаційного ковзання як способу акомодативної деформації під час мартенситного перетворення.

Щоб спостерігати ЕПФ, кристал мартенситу повинен піддаватися деформації, а потім нагріванню. При нагріванні вище за температуру A_n починається, а до A_s закінчується зворотне мартенситне перетворення кристала мартенситу на аустеніт.

Якщо при зовнішньому навантаженні деформація мартенситного кристала реалізовується механізмами двійникування, то при наступному нагріванні після розвантаження через зворотне мартенситне перетворення відбувається повне відновлення форми вихідного кристала аустеніту (рис. 1.2, *схема 4*). І тут у процесі прямого і зворотного перетворення атоми кристала зберігають сусідство один з одним.

Якщо деформація мартенситу здійснюється за механізмами ковзання, то при зворотному перетворенні знову потрібна

деформація, щоб зберегти форму кристала аустеніту, оскільки атоми у ґратах змінюють своїх сусідів. Очевидно, що якщо деформація кристала мартенситу протікає механізмами ковзання, повністю відновити вихідну макроформу кристала аустеніту неможливо (рис. 1.2, *схема 5*). Тому ефект пам'яті форми буде повністю реалізовуватись у тому випадку, коли матеріал деформується за механізмами двійникування.

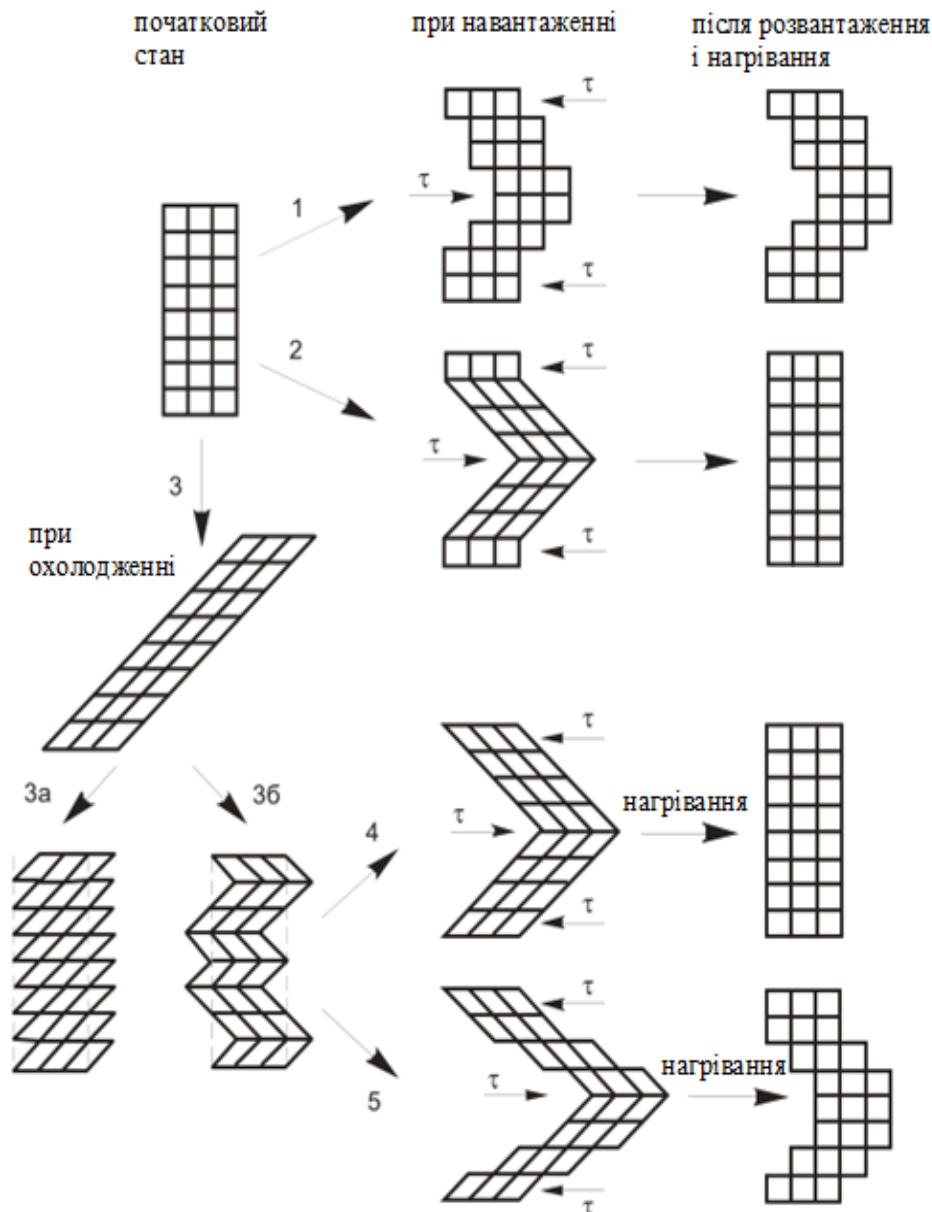


Рис. 1.2. Схема реалізації ефекту пам'яті форми і надпружності при зворотному переході аустенітної кристалічної ґратки (квадрати) у мартенсит (паралелограми) при зміні температури та деформації

Тепер якщо уявити, що ми навантажуюмо кристал аустеніту при температурі вищій від температури M_n , то у ньому виникають напруження, які відповідно до рівняння Клаузіуса-Клапейрона

підвищують температуру M_n . Вона може досягти значення, при якому відбувається навантаження кристала, і він зазнає перетворення на мартенсит. Оскільки мартенситний кристал має нижчу симетрію кристалічних ґраток, то ґратка аустеніту, представлена на рис. 1.2 у вигляді квадратів, трансформується у мартенситну ґратку, представлену у вигляді паралелограмів (рис. 1.2, *схема 2*). Якщо в якомусь напрямку діють розтягувальні напруження, то кристали мартенситу будуть орієнтуватися в ньому більшою діагоналлю паралелограма, якщо – стискаючі, то меншою. Отже, макроформа кристала зміниться. Якщо кристал розвантажити, то температура M_n знову стане нижчою за температуру навантаження. У випадку, якщо ця температура вища за A_c , то мартенсит зазнає переходу в аустеніт. При цьому форма кристала аустеніту повністю повернеться до вихідної (рис. 1.2 *схема 2*). Це явище називається надпружністю.

Отже, ефект пам'яті форми виявлятиметься у металах і сплавах, в яких протікає зворотне мартенситне перетворення, а деформація мартенситу відбувається за механізмом двійникування. Серед матеріалів з пам'яттю форми, в яких це явище зумовлене перебігом зворотного мартенситного перетворення, можна виділити дві основні групи: сплави на основі інтерметалідів з упорядкованою кристалічною структурою (TiNi, CuZn, AuCd тощо) та сплави на основі твердих неупорядкованих розчинів (Ti-Nb, Ti-Mo, Fe-Mn тощо). Відмінність у прояві ефекту пам'яті форми цих двох груп пов'язана переважно з тим, що у впорядкованих сплавах зазвичай легше реалізується двійникування кристалічної ґратки проти ковзання, що призводить до порушення порядку розташування атомів. Це забезпечує повніше протікання мартенситного перетворення без накопичення пластичної незворотної деформації, отже, до повного відновлення вихідної форми матеріалу. У сплавах з неупорядкованою структурою твердого розчину у процесі розвитку мартенситного перетворення під навантаженням стимулюється утворення та рух дислокацій, що призводять до незворотної формозміни матеріалу. Тому при зворотному мартенситному перетворенні немає повного відновлення форми, а величина відновленої деформації не перевищує 2–3 %, що становить трохи більше 30 % можливостей кристалографічної деформації перетворення [5–8].

1.2. Особливості прояву ефекту пам'яті форми у сплавах із впорядкованою та неупорядкованою структурою

1.2.1. Структура та властивості сплавів на основі нікеліду титану

Одним з інтерметалідів, в якому ефект пам'яті форми та надпружність виявляються найбільш яскраво при хорошому комплексі хімічних, фізичних та механічних властивостей, є нікелід титану. Нікелід титану є еквіатомним інтерметалідом з упорядкованою за типом CsCl кристалічною структурою B2 (рис. 1.3, а). Високотемпературна модифікація B2 при охолодженні в інтервалі температур $+100 \div -90^\circ\text{C}$ переходить у низькотемпературну B19 з орторомбічними кристалічними ґратами (рис. 1.3, б) або B19' з моноклінним спотворенням – мартенсит (рис. 1.3, в). У процесі такого перетворення може бути накопичено і при зворотному мартенситному перетворенні повернуто до 8 % деформації.

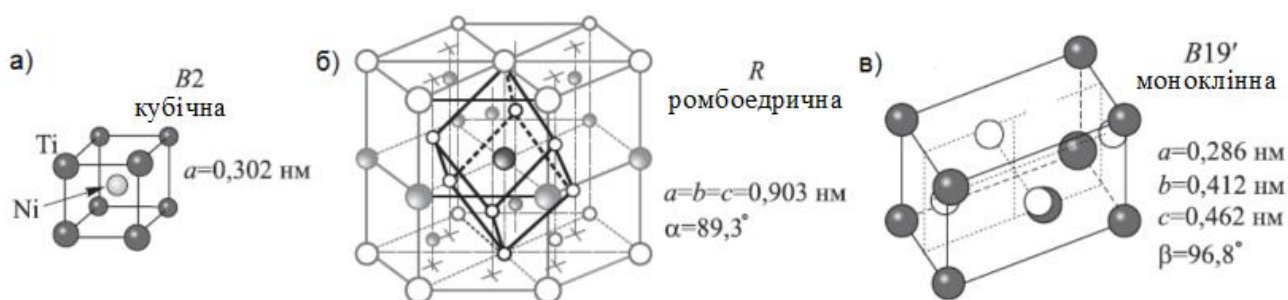


Рис. 1.3. Кристалічні структури TiNi

У нікеліді титану та сплавах на його основі високотемпературна фаза має B2-структуру (рис. 1.3, а). Область гомогенності B2-фази тягнеться від 49,5 ат. % при 1025°C до 55-57 ат. % Ni при 1100°C , але різко звужується зі зниженням температури [9], особливо з боку сплавів, багатих на нікель.

На рис. 1.4 наведено діаграму послідовності мартенситного перетворення (МП) в TiNi поблизу еквіатомного складу для загартованих при 800°C сплавів. На діаграмі можна виділити чотири концентраційні інтервали (А, Б, В, Г), в яких має місце різна послідовність МП при охолодженні та нагріванні.

У багатьох випадках вихідною позицією для реалізації ефекту пам'яті форми (ЕПФ) є фазовий склад сплаву за нормальної (кімнатної) температури після гартування. Щодо цього корисну інформацію можуть дати діаграми фазового складу загартованих сплавів. Вони показують зміну фазового складу в результаті

загартування залежно від температури нагрівання під загартування і концентрації легуючого компонента високотемпературної фази при цій температурі. Така діаграма для сплавів TiNi поблизу еквіатомного складу наведена на рис. 1.5. Також показані інтервали концентрацій, відповідні інтервалам А, Б, В, Г з рис. 1.4. Сукупність цих діаграм дає змогу вибирати оптимальну температуру нагрівання під загартування сплавів на основі нікеліду титану для забезпечення необхідного фазового складу за нормальної температури і послідовності МП.

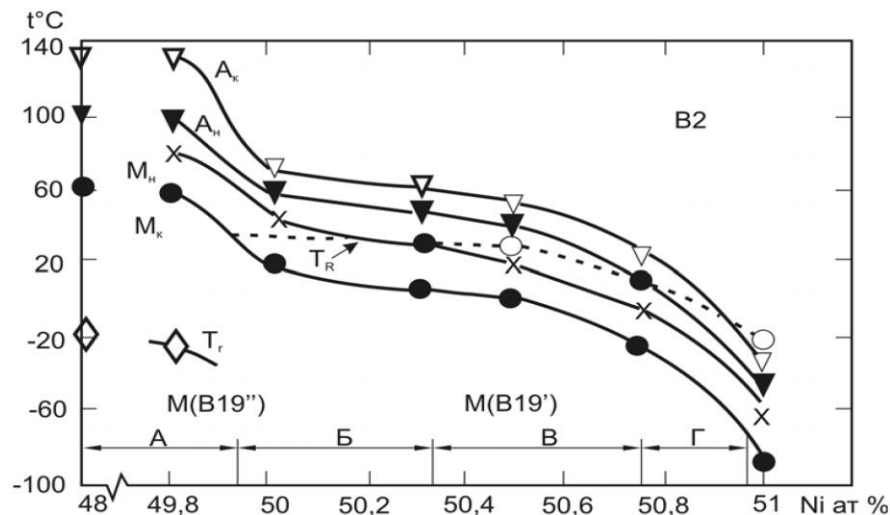


Рис. 1.4. Діаграми, які ілюструють послідовність протікання МП у сплавах системи Ti-Ni (попередній відпал при 800°C) (T_R – температура переходу моноклінного у триклінний мартенсит)

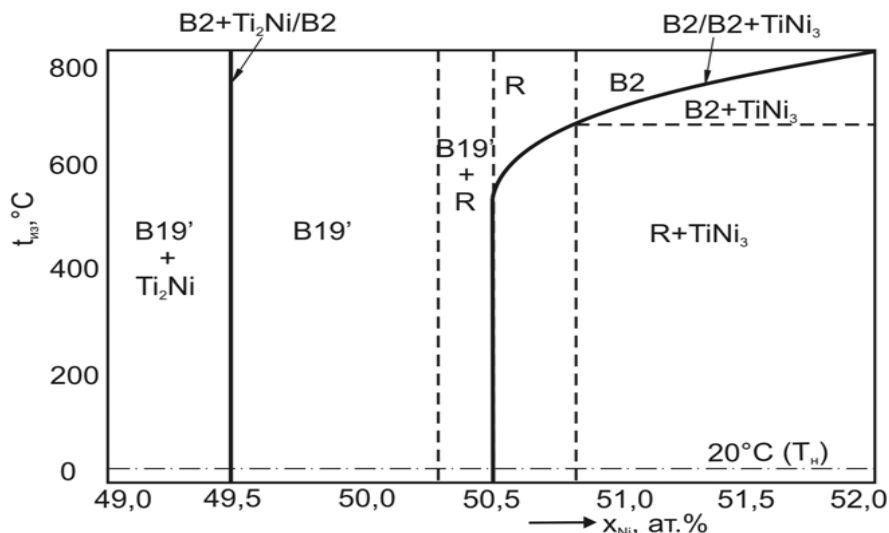


Рис. 1.4. Діаграма фазового складу загартованих сплавів системи Ti-Ni поблизу еквіатомного складу: суцільні лінії – температурно-концентраційні межі фазових областей у рівноважному стані; пунктирні – межі фазових областей після загартування.

1.2.2. Особливості технології одержання злитків та деформованих напівфабрикатів сплавів на основі TiNi

За своїми хімічними властивостями TiNi близький до титанових сплавів, оскільки його взаємодія з іншими речовинами визначає діоксин титану, який формується на поверхні металу. Основні особливості технології нікеліду титану (плавлення, обробка тиском) подібні до титанових сплавів, тому засвоєння виробництва нікеліду титану, як правило, відбувається на тих підприємствах, які виробляють титанові сплави. При температурах до 550°C, коли діоксид титану має структуру анатазу, титанові сплави мають дуже високу корозійну стійкість у більшості агресивних середовищ. При вищих температурах анатаз перетворюється на рутил, що різко зменшує захисні властивості діоксиду титану. Тому якщо проводиться обробка виробів з нікеліду титану при температурах вищих 550°C, їх поверхню необхідно захищати від окислення інертними газами (аргоном) або створювати вакуум. Однак у технології нікеліду титану є й низка особливостей, які ускладнюють процес отримання напівфабрикатів та виробів [10].

Насамперед це стосується виплавки злитків необхідного складу. Оскільки нікелід титану можна вважати найсильніше легованим сплавом, то для отримання зливка з точним хімічним складом необхідно забезпечити хороше перемішування всієї ванни рідкого металу. Часто застосовують комбінований метод, який полягає у вакуумній плавці та подальшому вакуумному електродуговому переплаві. Однак цей спосіб не дає змогу отримати достатньо однорідний зливочок необхідного хімічного складу. Останніми роками почали застосовувати вакуумний індукційний переплав в установці з холодним тиглем. В останньому випадку забезпечується інтенсивне перемішування розплаву у магнітному полі індуктора та мінімальна його взаємодія з навколишнім середовищем. Але, незважаючи на це, забезпечити прецизійність складу з точністю до 0,1 % компонентів не вдається. Водночас від вмісту титану та нікелю сильно залежать від температури мартенситного перетворення матеріалу, а отже, і температура відновлення його форми. На рис. 1.6 наведено вплив вмісту нікелю у сплаві на основі нікеліду титану на температури відновлення. Видно, що у вузькій ділянці складів у межах 1–1,5 % нікелю температури відновлення можуть змінюватися від +110 до –70°C. Крім того, для більшості пристроїв, які використовують ЕПФ, точність цих температур повинна бути не гіршою за ± 5 і навіть $\pm 1^\circ\text{C}$.

Забезпечити необхідну для цього точність складу сплаву по всьому об'єму злитку металургійними методами практично неможливо. Тому необхідно керувати структурою матеріалу при подальшій обробці напівфабрикату так, щоб забезпечити необхідні температури відновлення форми [11].

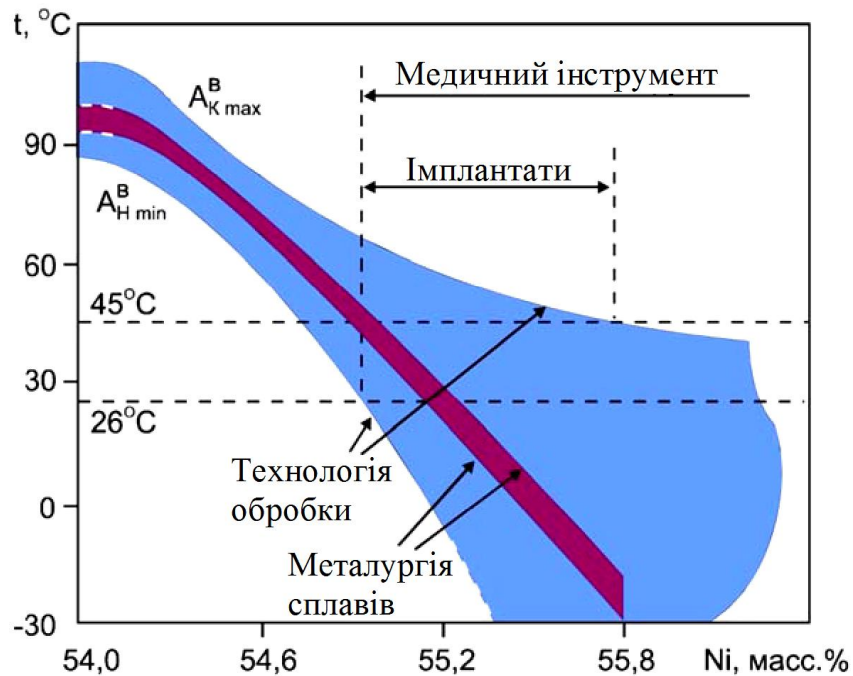


Рис. 1.6. Залежність температур відновлення форми від вмісту нікелю у сплавах на основі нікеліду титану

Можливі два основні підходи до виробництва злитків та напівфабрикатів із нікеліду титану [12]:

1. Застосовувати комбінований метод (плавка з наступним вакуумнодуговим переплавом) для плавки великих за обсягом злитків і, після отримання з них основних напівфабрикатів, піддавати їх селективному відбору за температурою відновлення форми з подальшим постачанням матеріалу з необхідними характеристиками замовнику.

2. Проводити виплавку вакуумно-індукційним методом невеликих зливків з досить точним хімічним складом з можливістю подальшого повторного переплаву з коригуванням хімічного складу для забезпечення необхідних характеристик матеріалу.

Перший підхід ефективніший при великому обсязі споживання матеріалу з різними характеристиками. Другий – ефективний у разі, коли споживачеві потрібно невеликий обсяг матеріалу з регламентованими характеристиками.

Особливості переробки зливку нікеліду титану на напівфабрикат пов'язані з досить вузькою температурною областю його деформації. При температурах понад 1000°C можливе розплавлення евтектичних та передевтектичних кристалів, присутніх у зливках. При температурах нижчих 950° пластичність сплаву не завжди достатня для значної деформації та опрацювання структури. У процесі гарячої деформації зливка сплаву на основі нікеліду титану необхідно розв'язувати два основні завдання: отримання необхідної геометрії напівфабрикату та формування необхідної структури. Остання задача актуальна внаслідок низьких механічних властивостей литої структури. Це пов'язано як із грубо дендритною будовою В2-фази, так і з утворенням великої об'ємної частки інтерметаліду Ti_2Ni (рис 1.7). Цей багатий на титан інтерметалід не повинен утворюватися при концентраціях титану та нікелю у межах паспортного складу сплавів ТН1 та нітинолу. Очевидно, його утворення провокується наявним у сплаві киснем у вигляді формування сполуки $\text{Ti}_4\text{Ni}_2\text{O}$, за своєю кристалічною структурою, близькою до інтерметаліду Ti_2Ni .

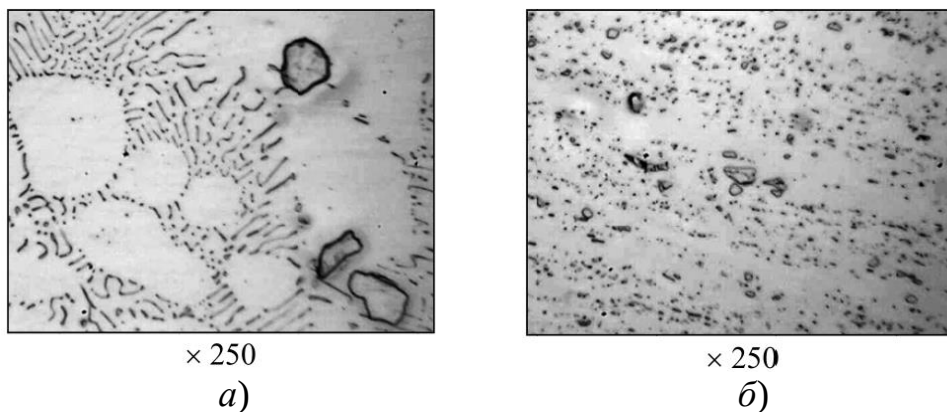


Рис. 1.7. Мікроструктура зливка, одержаного комбінованим методом (а) та деформованого напівфабрикату (б) сплаву на основі нікеліду титану

Тому у сплавах із підвищеним вмістом домішкового кисню міститься досить багато (до 20 %) інтерметаліди, багатого на нікель. Його присутність у сплаві не тільки знижує пластичність матеріалу, а й змінює склад співіснуючої з ним В2-фази, зв'язуючи собою частину титану. Внаслідок цього змінюються температури мартенситного перетворення В2-фази, що ускладнює забезпечення необхідних термомеханічних властивостей матеріалу.

Домішковий кисень вноситься у сплав із шихтовим матеріалом, а також окисленням розплаву в процесі плавки. Електролітичний нікель, який використовується для плавки сплавів на основі нікеліду

титану, містить дуже мало кисню і значно не впливає на його кінцевий вміст у матеріалі. Як шихта титану може бути використаний йодний, губчастий титан або брукхт сплаву BT1-0.

Методи плавки також впливають на кількість домішок, оскільки під час перебування сплаву у розплавленому стані він активно взаємодіє з навколишньою атмосферою та матеріалом тигля. Найбільше насичення киснем відбувається при плавці, а найменше – при вакуумно-дуговому переплавленні з електродом, що витрачається, і вакуумно-індукційній плавці. У такому разі необхідно мінімізувати взаємодії розплаву з матеріалом тигля. Це можливо застосуванням розрізного мідного тигля або тигля, що охолоджується, зі спеціальної кераміки, та нерозчинного в рідкому металі. У всіх розглянутих випадках, що більше міститься в сплаві кисню, то вища об'ємна частка інтерметаліду Ti_2Ni (Ti_4Ni_2O) та температури відновлення форми. Тому при однаковому змісті основних компонентів у сплаві його температури відновлення форми значно змінюються від якості шихти та методу плавки.

При гарячій деформації зливка необхідно забезпечити необхідну геометрію напівфабрикатів і перетворити вихідну литу структуру, роздробити гілки дендритів В2-фази (отримати рівновісні дрібні зерна) і частинки інтерметаліду Ti_2Ni . Останні бажано рівномірно розподілити по об'єму матриці, не даючи їм зосередитись на межі В2-зерен. Ці частинки мають значно вищу твердість порівняно з пластичною В2-матрицею і можуть суттєво окрихчувати матеріал.

Розв'язання одночасно двох найчастіше протилежних завдань потребує оптимізації режимів деформації. Так, для забезпечення геометрії напівфабрикату необхідно підвищувати температуру деформації, а перетворення її структури бажано знизити. Тому зазвичай обробку деформацією злитків сплавів з урахуванням нікеліду титану проводять у кілька етапів. На першому при максимально високих температурах (980–1000°C) треба провести осадку або пресування зливка на 30–40 %, щоб розбити грубу литу структуру і надати заготовці форму, зручну для подальшого отримання необхідного напівфабрикату. На наступних стадіях прокатки прутків або листів температуру деформації поступово знижують з 960–980°C до 700–800°C. Це робиться для того, щоб у процесі динамічної рекристалізації подрібнити В2-зерно та забезпечити рівномірний розподіл в об'ємі матриці частинок Ti_2Ni .

Волочіння дроту або прокатування тонких листів бажано проводити при температурах 550–600°C. У деяких випадках, коли

потрібно провести наклеп В2-фази, наприклад, для забезпечення високих характеристик надпружності, деформацію (не менше 20 %) напівфабрикату закінчують за нормальної температури. З напівфабрикатів сплавів на основі нікеліду титану (лист, прутки, дрот, труба) механічною, електроерозійною, лазерною різкою виготовляють заготовки виробів. Важливо зазначити, що через погану оброблюваність різанням переважають є два останні види обробки. Остаточну форму виробу, як правило, задають деформацією. Вона може бути «активною» – коли заготовку деформують при температурах 500–600°C, або «пасивною» – якщо деформація здійснюється за нормальної або навіть негативних температур (за рахунок передвійникування при деформації на 10–12% матеріалу у мартенситному стані), після чого виріб відпалюють при температурі 450–550°C. Задана таким у такий спосіб форма виробів буде «вихідною», до якої вона має повертатися під час реалізації ЕПФ.

1.2.3. Особливості структури та властивостей сплавів на основі міді

Базовими системами до створення сплавів з ЕПФ є подвійні системи Cu-Al, Cu-Sn, Cu-Zn. Однак через невисоку термічну стабільність (системи Cu-Al та Cu-Sn) або дуже низьку температуру реалізації МП (система Cu-Zn) більшість сплавів на основі міді є трикомпонентними або складнішими композиціями. Сплави цієї групи виявляють усі види ЕПФ, проте рівень характеристик та їхня стабільність визначаються хімічним складом і структурою. З великої кількості сплавів на основі міді практичний інтерес становлять сплави Cu-Al-Ni та Cu-Zn-Al, а також складнолеговані сплави на їх основі.

Область складів сплавів системи Cu-Al-Ni, які виявляють ЕПФ, розташовується в основному поблизу евтектоїдного складу. Додавання 3–4,5 мас. % Ni знижують дифузійну рухливість атомів Cu та Al, запобігаючи тим самим евтектоїдному розпаду високотемпературної фази при загартуванні, в процесі якого при температурах вище M_n відбувається упорядкування ($t_y \approx 500^\circ\text{C}$). Упорядкована β_1 -фаза при подальшому охолодженні зазнає МП з утворенням γ'_1 мартенситу. Зі збільшенням змісту Al характеристичні температури МП інтенсивно знижуються (рис. 1.8). Вплив Ni менш суттєвий, хоча тенденція до їх зниження спостерігається [13].

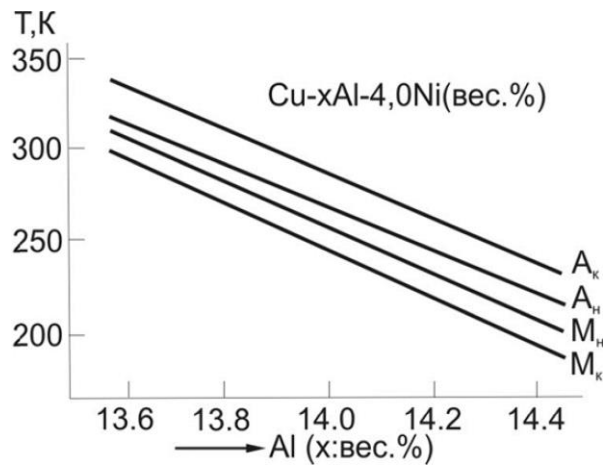


Рис. 1.8. Вплив вмісту Al на характеристичні температури МП у сплавах системи Cu-xAl-4Ni (мас.%) (загартування з 1000°C в крижаний воді, після отримання β -твердого розчину)

Змінна розчинність легуючих елементів у β -фазі, евтектоїдне перетворення та істотна залежність характеристичних температур МП від ступеня легування β -фази дозволяють, з одного боку, змінювати температурний інтервал реалізації ЕПФ за допомогою термічної обробки, а з іншого – вимагають жорсткого контролю її режимів, підбір яких необхідно здійснювати кожному за конкретного складу. Загальна тенденція для складів, які розглядаються, така, що зниження температури нагріву під загартування або швидкості охолодження при загартуванні, збільшення температури або тривалості старіння призводять до підвищення M_n за рахунок виділення проміжних і рівноважних фаз. Однак важливо контролювати ступінь розпаду при старінні, оскільки на пізніх стадіях може статися погіршення характеристик відновлення форми або навіть повна втрата здатності виявляти ЕПФ. Власне тому максимальна робоча температура сплавів Cu-Al-Ni обмежена 100°C [14].

Для полікристалічних сплавів системи Cu-Al-Ni проблема низької тріщиностійкості як при термічній обробці, так і при циклічному деформуванні є основною у плані практичного використання цих сплавів. Зародження тріщин та руйнування відбувається за межами зерен. Спроби уникнути міжзеренного руйнування зменшенням розміру зерна шляхом мікролегування та оптимізацією технології отримання і обробки сплавів хоч й дозволили дещо поліпшити властивості, але не настільки, щоб відкрити їм широку перспективу застосування. У цьому плані значно більше зацікавлення викликають монокристали сплавів Cu-Al-Ni, і навіть сплави системи Cu-Zn-Al.

1.2.4. Сплави на основі титану

У титані та сплавах на його основі високотемпературна β -фаза з неупорядкованою ОЦК структурою може зазнавати при загартуванні три МП: $\beta \rightarrow \alpha'$ (ГП), $\beta \rightarrow \omega$ (гексагональна) та $\beta \rightarrow \alpha''$ (орторомбічна), з яких тільки останнє відповідає майже всім вимогам (крім упорядкування) для прояву ЕПФ.

Незважаючи на відсутність упорядкування, внутрішня двійникова будова мартенситу, забезпечує майже повну кристалографічну оборотність $\alpha'' \rightarrow \beta$ МП при нагріванні, але через низьку термічну стабільність мартенситу та β -фази зворотне МП може бути реалізоване лише при високих швидкостях нагрівання. Тому більшість сплавів на основі титану, в яких виявлений ЕПФ, містять досить велику сумарну кількість β -стабілізаторів (V, Mo, Fe, Cr), що зменшує критичну швидкість нагрівання. Це дає змогу забезпечити протікання МП при негативних або дуже високих, порівняно з кімнатною, температурах [15].

Необхідний фазовий склад та хімічний склад фаз зазвичай досягається підбором температури нагрівання під загартування або хімічного складу сплаву. Оптимальний з точки зору прояву ЕПФ хімічний склад сплавів повинен містити від 5 до 10 % Al, а кількість ізоморфних (V, Mo) та евтектоїдоутворювальних (Cr, Fe) β -стабілізаторів повинна відповідати коефіцієнту β -стабілізації, що дорівнює одиниці.

Для сплавів із широким інтервалом МП (100–150°C), якими є сплави на основі титану, суттєво обмежені можливості зміни температури навантаження для накопичення деформації. Найчастіше навантаження проводять при кімнатній температурі, домагаючись необхідних умов підбором хімічного складу β -фази, наприклад, загартуванням з оптимальної температури. Але навіть при забезпеченні оптимальних термодинамічних умов повністю реалізувати надпружність у титанових сплавах не вдається, хоча її частка в окремих випадках може бути досить велика. Основна частина накопиченої деформації усувається під час нагрівання за рахунок реалізації ЕПФ.

Отже, необхідні умови для реалізації ЕПФ у сплавах титанових можуть забезпечуватися двома способами.

По-перше, це створення нових сплавів, хімічний склад яких забезпечує після гартування з β -області формування необхідного фазового складу та структури. Використовуючи як еквівалент

концентрації β -стабілізатора умовний коефіцієнт стабілізації β -фази K_β , треба підкреслити, що новостворювані сплави повинні бути леговані β -стабілізаторами в кількості, еквівалентній $K_\beta = 0,8-1,1$. Це можуть бути прості композиції, наприклад, на основі Ti-Al-V, Ti-Al-Mo, Ti-Ta-Nb або багатокомпонентні сплави [16].

По-друге, необхідний фазовий склад і структура можуть бути забезпечені підбором відповідних режимів термообробки наявних промислових конструкційних титанових сплавів, для яких зміною температури нагріву під загартування можна варіювати хімічний склад β -фази. До них належать сплави VT16, VT23, VT22 та VT22I, в якому порівняно зі сплавом VT22 знижено вміст алюмінію [17].

1.2.5. Сплави на основі заліза та марганцю

У сплавах на основі Fe і Mn вискотемпературна γ -фаза має неупорядковану ГЦК структуру, що визначає цілу низку особливостей мартенситного перетворення та пов'язаних з ними ЕПФ. У сплавах Fe-Pd, а також марганцю з Cu, Ni, Ge, Pd або Ag протікає бездифузійне ГЦК $\rightarrow$ ГЦТ перетворення, при якому в граничному випадку деформація решітки може досягати 2–3 %. У реальних умовах ε_H значно менша і багато в чому визначається умовами накопичення деформації та видом ЕПФ. Найбільш стабільні характеристики спостерігаються при оборотному ЕПФ. У сплавах на основі Mn оборотна при великій кількості циклів деформація становить близько 0,5 %. Ефектів псевдопружності цих сплавів не виявлено.

У сплавах на основі Fe, крім того, реалізуються $\gamma \rightarrow \alpha$ (ГЦК $\rightarrow$ ОЦК) та $\gamma \rightarrow \varepsilon$ (ГЦК $\rightarrow$ ГП) МП. Перше – у сплавах на основі системи Fe-Ni, друге – на основі системи Fe-Mn. За зрозумілими причинами відновлення форми у сплавах подвійних систем Fe-Ni та Fe-Mn неповне, величина ε_B не перевищує 0,7 %. Однак на базі саме цих систем відбувався пошук технології обробки, здатної забезпечити практично значущу величину для наявних сплавів або пошук нових складів. В основу покладено такі принципи: а) підвищення межі плинності або зниження модуля пружності γ -фази; б) зменшення об'ємного ефекту та зсувної деформації мартенситного перетворення; в) збільшення ступеня тетрагональності ґраток мартенситу; г) зниження температури мартенситного перетворення для полегшення процесу двійникування при акомодатії [18].

Найбільш перспективними виявилися сплави систем Fe-Ni-Nb, Fe-Ni-Ti-Co та Fe-Mn-Ni. У сплавах Fe-Ni-Nb ступінь тетрагональності ґратки мартенситу невисока, але виділяються дисперсні частки Ni_3Nb та Fe_3Nb , що сприятливо впливає на прояв ЕПФ. Однак величина $\varepsilon_b > 1\%$ при СВФ = 100 % може бути досягнута тільки при попередній циклічній обробці за схемою: деформація – відновлення форми. Температури початку та кінця зворотного мартенситного перетворення можуть бути змінені шляхом підбору хімічного складу [19].

1.3. Основні напрями застосування функціональних матеріалів з пам'яттю форми у техніці та медицині

1.3.1. Особливості застосування пристроїв з ефектом пам'яті форми

Проектування пристроїв з елементами матеріалу з пам'яттю форми (МПФ) значно відрізняється від розробки деталей з конструкційних матеріалів.

За особливостями застосування пристроїв з ефектом пам'яті форми їх доцільно розбити на кілька груп, що мають близький підхід до вибору МПФ, точного хімічного складу, технології отримання та обробки. У межах однієї групи можна застосовувати єдиний підхід до вироблення технічних вимог до матеріалу та комплексу його термомеханічних властивостей, а також реалізувати загальні для цієї групи пристроїв принципи проектування виробів, які забезпечують необхідні характеристики працездатності [20, 21].

За принципом роботи пристрою можна поділити на такі види:

- надпружні;
- спрацьовують одноразово;
- спрацьовують багаторазово.

За умовами протидії формозміні елемента з пам'яттю форми пристрою можливі такі варіанти:

- відновлення форми виробів відбувається у відсутності протидії, тобто у вільному стані (конструкції, які трансформуються);
- формозміна виробу здійснюється в умовах жорсткої протидії (термомеханічні сполуки);
- у процесі відновлення форми протидія незначна або може змінюватись за величиною (термосилові елементи).

За температурами початку та кінця відновлення форми (A_{Π}^B , A_K^B):

- низькотемпературні ($A_K^B < 0^\circ\text{C}$);
- середньотемпературні ($0 < A_{\Pi}^B$, $A_K^B < 50^\circ\text{C}$);
- високотемпературні ($A_{\Pi}^B > 50^\circ\text{C}$).

За середовищем експлуатації ті, що працюють у:

- неагресивному середовищі;
- агресивному середовищі;
- біологічних середовищах.

Залежно від умов експлуатації виробів із МПФ (робочі температури та температури спрацьовування, наявність зусиль

протидії, циклічні деформації та навантаження тощо) можна виділити кілька основних напрям застосування, які визначатимуть деякі специфічні вимоги до термомеханічних властивостей матеріалу.

1.3.2. Конструкції трансформуються

У цьому випадку виріб при температурі експлуатації перебуває нижче за $A_{\text{П}}^{\text{В}}$ у деформованому (складеному) стані. При нагріванні вище температури $A_{\text{К}}^{\text{В}}$ він набуває вихідної (розправленої) форми. У такому стані на виріб не повинні діяти значні навантаження, які могли б деформувати його при охолодженні до температур експлуатації за рахунок розвитку пластичності перетворення.

Конструкції, що трансформуються, як правило, включають елементи з конструкційних матеріалів і МПФ. Завдання елементів з МПФ при нагріванні вище за певну температуру – змінити свою форму заданим чином і надати нового положення з'єднанням з ними елементам з конструкційного матеріалу. Прикладом таких конструкцій можуть бути системи розгортання антени та розкриття сонячних батарей на космічних апаратах (рис. 1.9). У цьому випадку панелі сонячних батарей з'єднані між собою пластинами або дрютяними елементами МПФ. У вихідному стані цим елементам надається форма, що відповідає повністю розкритій батареї. Потім елементи деформуються, і блоки складаються у компактну транспортну форму. Після виведення космічного апарата на орбіту елементи МПФ нагріваються вище температури $A_{\text{К}}^{\text{В}}$ (зазвичай пропусканням електричного струму) і, прагнучи прийняти вихідну форму, розгортають сонячну батарею у робочу форму [22, 23].

Для оптимального використання у конструкціях, які трансформуються, МПФ повинен мати температури зворотного мартенситного переходу вищі від температур експлуатації виробу і максимальну величину відновлюваної деформації. Такі характеристики можуть забезпечити сплави на основі нікеліду титану з малим вмістом нікелю з рекристалізованою структурою.

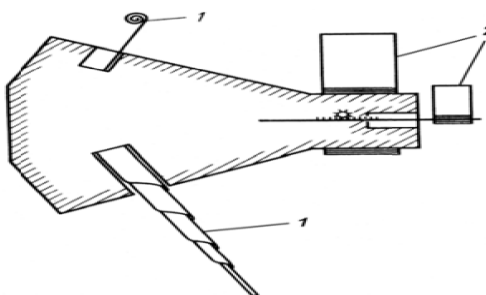


Рис. 1.9. Конструкції космічного апарата, які трансформуються:

- 1 – антени, що саморозгортаються;
- 2 – елементи сонячних батарей

У конструкціях, які трансформуються, елементи з МПФ у процесі відновлення форми, як правило, не зазнають значної протидії. Тому їх можна віднести до групи конструкцій, які вільно відновлюються. Залежно від призначення – елементи можуть бути як для одноразового, так і багаторазового спрацьовування. Оскільки транспортна форма конструкції має зберігатися до спрацьовування в інтервалі температур експлуатації, матеріал для виготовлення елементів повинен мати високі температури відновлення форми. Вимоги до корозійної стійкості матеріалу визначаються середовищем експлуатації конструкції.

Розрахунок елементів конструкцій, які трансформуються, в основному зводиться до вибору оптимальної схеми і ступеня деформації, які дають змогу визначити геометрію цього елемента і технологію його застосування. При виборі схеми деформації необхідно керуватися такими міркуваннями:

1. Максимальні переміщення можна реалізовувати при деформації згинання, мінімальні – при стисканні.

2. Ступінь деформації елемента, призначеного для багаторазового спрацьовування, не повинен перевищувати першу критичну ступінь деформації ($\varepsilon_{\text{кр}}^1$). У цьому випадку при нагріванні спостерігатиметься повне відновлення форми (СВФ = 100 %) і після охолодження до температури M_d елемент можна повторно деформувати і нагрівати без порушення геометрії. Якщо елемент призначений для одноразового спрацьовування, то рівень деформації можна підвищити до другого критичного рівня ($\varepsilon_{\text{кр}}^2$). У цьому випадку ступінь відновленої деформації буде максимальним, але повного повернення до вихідної форми при нагріванні не відбудеться.

Температура кінця відновлення форми (A_K^B) МПФ також залежить від ступеня деформації. Як правило, що вищий ступінь деформації – що вища температура повернення до вихідної форми. Тому при виборі матеріалу необхідно визначити A_K^B після вибору необхідного ступеня деформації елемента.

1.3.3. Термомеханічні з'єднання

Такі з'єднання, як правило, є муфтами (втулками) з внутрішнім діаметром меншим від зовнішнього діаметра труб, які з'єднуються. У охолодженому стані муфти дорнують (через внутрішній отвір продавлюють конусний пуансон) для збільшення діаметра. Після цього кінці трубопроводів заводять у муфту, яка при нагріванні зменшується в діаметрі та обтискає труби (рис. 1.10). Уперше

термомеханічні з'єднання (ТМЗ) були використані у вигляді муфт для збирання трубопроводів американських літаків F-14 [24].



Рис. 1.10. Схема застосування термомеханічних з'єднань для збирання трубопроводів: 1 – вихідні розміри муфт і труб (внутрішній діаметр муфти d_m менший ніж зовнішній діаметр труби d_m); 2 – після дорнування муфти при низьких температурах (деформація муфти вздовж діаметра, внутрішній діаметр муфти (d'_m) більший, ніж діаметр труби); 3 – складання з'єднання; 4 – термомеханічне з'єднання після відігрівання до температур експлуатації (муфта відновлює свою форму, стискається вздовж діаметра та герметично охоплює кінці труб).

За особливостями застосування муфти для збирання трубопроводів можна віднести до конструкцій, що спрацьовують одноразово і які відновлюють форму в умовах протидії. Температури відновлення форми матеріалу муфти залежать від температур її експлуатації.

Відновленню форми муфти при нагріванні перешкоджатиме труба, на яку ця муфта була надіта після деформації. Унаслідок цього в муфті виникають реактивні напруги (σ_r), які забезпечують надійну посадку муфти на трубу (рис. 1.11). Ця напруга повинна зберігатися у всьому інтервалі температур експлуатації з'єднання ($T_{\min}$ - $T_{\max}$). Однак при високих температурах у матеріалі може початися релаксація напруги внаслідок розвитку процесів повернення, що обмежує робочі температури зверху ($T_{\max}$). При зниженні температури експлуатації ТМЗ до початку мартенситного перетворення в матеріалі буде

спостерігатися пластичність перетворення, при якій реактивні напруги також релаксують. Тому робочі температури ТМЗ повинні бути вищими за температури прямого мартенситного перетворення, але нижчими за температуру розвитку процесів повернення [25].

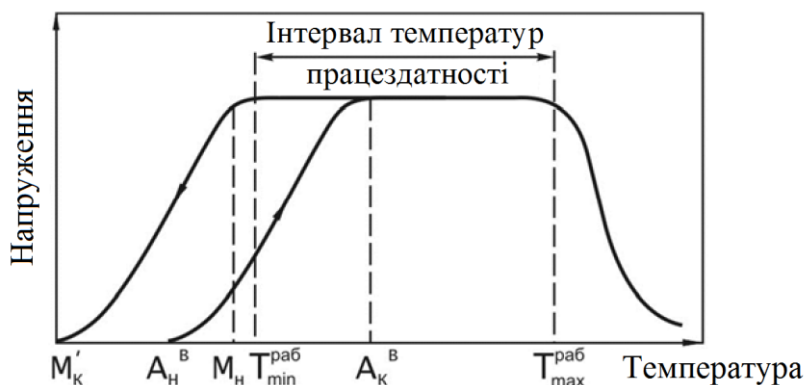


Рис. 1.11. Розвиток та релаксація напруг при нагріванні та охолодженні муфти з МПФ

Для більшості авіаційних систем температура експлуатації відповідає інтервалу від -50 до $+50^{\circ}\text{C}$. Тому їм необхідно вибирати низькотемпературний МПФ з дуже низькими температурами мартенситного перетворення і $A_K^B < -50^{\circ}\text{C}$.

З цією метою сплави на основі нікеліду титану легують 2–3 % заліза, яке знижують M_H до $-70 \div -90^{\circ}\text{C}$. У такому разі деформацію (роздачу) муфти та складання трубопроводу проводять у рідкому азоті (-196°C), а відновлення форми муфти відбувається при відігріванні до температур експлуатації.

Для забезпечення високих реактивних напруг матеріал муфти повинен мати досить великий рівень напруг ковзання і задовільну величину деформацій, які відновлюється. Таке поєднання термомеханічних характеристик сплавів на основі нікеліду титану спостерігається у матеріалу в полігонізованому стані.

Для ТМЗ, які експлуатуються за нормальних і підвищених температур, може використовуватися середньотемпературний матеріал.

1.3.4. Термосилові виконавчі елементи

Вони використовуються у різних конструкціях, які при природній чи примусовій зміні температури виконують певну роботу з відновлення форми. Такі силові елементи можуть бути такими, що спрацьовують як одноразово, так і багаторазово. За температурами

спрацьовування матеріал термосилових елементів повинен належати до середньо- або високотемпературних.

Прикладом можуть слугувати датчики термостатів, які залежно від температури відкривають або закривають протоки з гарячим або холодним повітрям (водою, паливом тощо). Матеріал таких елементів повинен мати оборотний, двоколійний ефект пам'яті форми. Однак величина такого ефекту навіть у найкращих з такої точки зору матеріалах, як правило, не перевищує 1,5 %. Тому доцільніше використовувати елемент зміщення – тобто елемент з конструкційного матеріалу (титан, сталь, полімер тощо), який у поєднанні з елементом з МПФ створює конструкцію, яка зворотно змінює свою форму при термоциклуванні через інтервал мартенситного перетворення [26].

Найпростішим прикладом такої конструкції може бути пружина з МПФ, яка одним кінцем прикріплена до опори, а до іншого кінця підвішений вантаж, який виконує роль елемента зміщення. При охолодженні нижче M_H вантаж розтягує пружину, а при нагріванні вище A_H пружина піднімає вантаж (рис. 1.12, а). Унаслідок цього конструкція зворотно змінює свою форму при термоциклуванні через інтервал мартенситних перетворень і може виконувати корисну роботу [27, 28].

Такі пристрої уже використовуються у кондиціонерах, термостатах спортивних автомобілів, у різних ювелірних виробах та іграшках. В останньому випадку, наприклад, елемент МПФ, з'єднаний зі сталеною пружиною або полімером при нагріванні розправляє пелюстки квітки або крила метелика, а при охолодженні складає їх (рис. 1.12, б) [28].

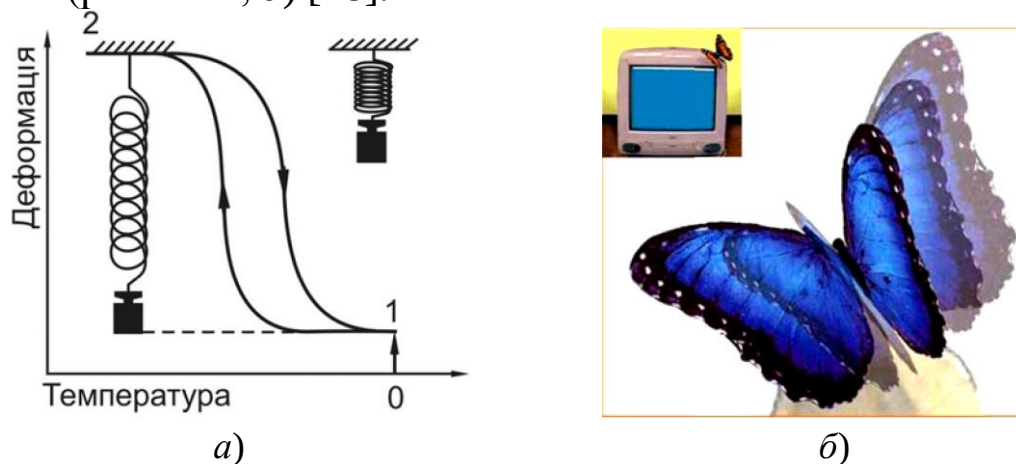


Рис. 2.4. Приклади використання МПФ у різних пристроях: а) вантаж, підвішений на пружині з МПФ (0 – вихідний стан пружини; 1 – пружна деформація пружини під дією вантажу; 2 – накопичення оборотної деформації при охолодженні); б) декоративний елемент – метелик

1.3.5. Температурні датчики та терморегулятори

Температурні датчики найчастіше використовують як конструкції що спрацьовують одноразово вільно відновлюють свою форму. Прикладом можуть бути пожежні датчики, які при досягненні певної температури включають сигналізацію або систему гасіння. Оскільки температура їх спрацьовування так вища 70°C і експлуатуються вони в атмосферних умовах, то як МПФ можуть бути використані високотемпературні сплави на основі нікеліду титану ТН1, ТНМЗ ($5\div 120^{\circ}\text{C}$) або сплави титану ВТ16, ВТ22І ($150\div 450^{\circ}\text{C}$). На рис. 1.13 показано принципову схему пожежного датчика [27].

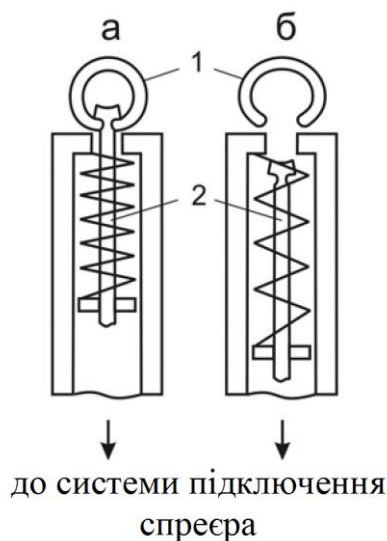


Рис. 1.13. Принципова схема пожежного датчика 1 елемент МПФ; 2 – пружний шток датчика. а) у зведеному стані; б) після спрацьовування при $T > 70^{\circ}\text{C}$

У цьому випадку розрізне кільце МПФ попередньо стискається так, щоб зменшити зазор між кінцями кільця у місці розрізу. У такому деформованому вигляді кільце заводиться у проріз пружинного штока датчика і утримує його у «зведеному» положенні. При досягненні необхідної температури кільце відновлює свою форму, відстань між кінцями кільця розрізного збільшується, шток звільняється і включає систему сигналізації.

У терморегуляторах елементи з МПФ можуть виконувати більш складне завдання – залежно від температури навколишнього середовища, багаторазово здійснювати необхідну дію. У таких конструкціях може бути використаний матеріал, який має зворотний (двоколіїний) ефект пам'яті форми, який у досить вузькому інтервалі температур ($15\div 20^{\circ}\text{C}$) може при нагріванні та охолодженні багаторазово змінювати форму і, наприклад, замикати або розмикати електричне коло, регулюючи, у такий спосіб, температуру середовища навколо елемента. Сьогодні для цього використовують

біметалічні елементи, які складаються з двох або більше металевих матеріалів з різними коефіцієнтами лінійного термічного розширення. Але такі елементи характеризуються дуже малою зміною форми від температури (рис. 1.14) і можуть здійснювати дію лише в одному напрямку. Використання МПФ для виготовлення терморегуляторів дає змогу зменшити габарити і масу конструкцій, забезпечити точніше спрацьовування в необхідному інтервалі температур і змінювати форму при складному просторовому переміщенні.

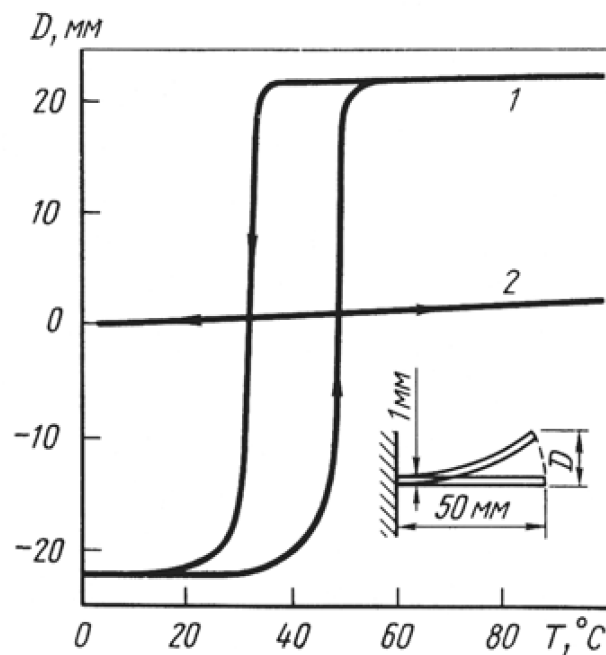


Рис. 1.14. Порівняння характеристик біметалічних елементів та термочувливих елементів із ефектом пам'яті форми: 1 – пластина з матеріалу із оборотним ефектом пам'яті форми; 2 – біметал

Однак використання зворотного ефекту пам'яті форми потребує досить складного технологічного процесу обробки елемента та неефективного використання дорогого МПФ.

У більшості конструкцій терморегуляторів отримати необхідний ефект можна, використовуючи матеріал з одностороннім ЕПФ і протидіючий елемент зі звичайного конструкційного матеріалу. Приклади таких конструкцій наведені на рис. 1.15 та 1.16.

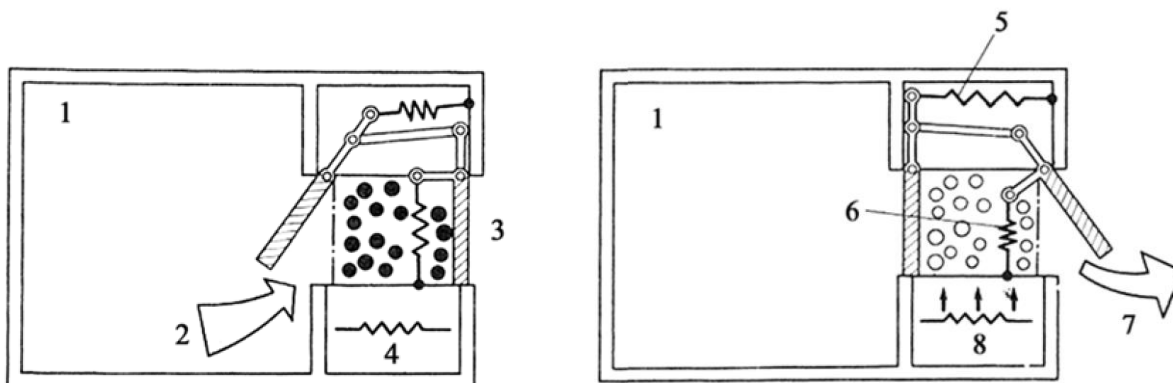


Рис. 1.15. Принципова схема дії автоматичної сушильної шафи: 1 – камера сушіння; 2 – напрям поглинання вологи; 3 – вологопоглинач; 4 – вимкнений нагрівач; 5 – пружина зміщення; 6 – спіраль зі сплаву з пам'яттю форми; 7 – напрям видалення вологи; 8 – увімкнений нагрівач

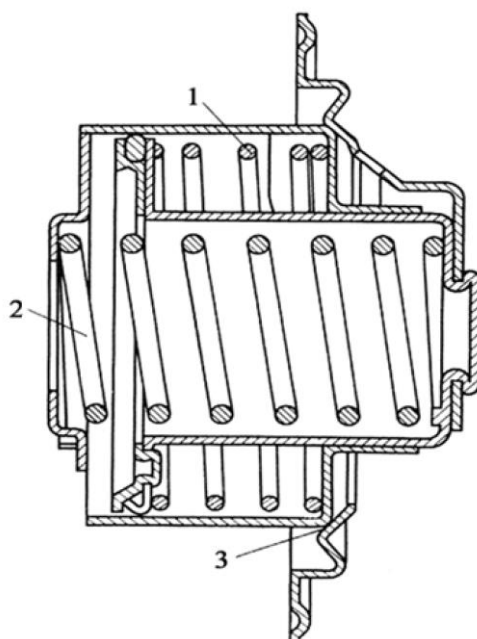


Рис. 1.16. Автомобільний радіаційний термостат: 1 – пружина зміщення; 2 – спіраль зі сплаву з пам'яттю форми; 3 – клапан

1.3.6. Теплові двигуни

За принципом механічної дії теплові двигуни на основі МПФ можна поділити на три основні групи: 1) двигуни з кривошипно-шатунним механізмом; 2) турбодвигуни; 3) гравітаційні двигуни. Принцип дії двигунів з кривошипно-шатунним механізмом такий самий, як і звичайних бензинових та дизельних. Елемент МПФ встановлюється між колесом, що має центральний вал, і кривошипним валом, причому осі колеса і валу зміщені один відносно одного. Подовження та скорочення елемента з МПФ

залежно від температури, діють так само, як зворотно-поступальний рух поршня у звичайних двигунах, і викликають обертання колеса.

Схема такого двигуна наведена на рис. 1.17. Як силовий елемент з ЕПФ застосовуються спіралі або стрижні зі сплаву TiNi. Силовий елемент у деформованому стані (спіраль – стиснута, а стрижень – зігнутий у формі літери U) поміщений між кривошипним валом, який обертається навколо фіксованої осі і приводним шківом, який обертається навколо зміщеної відносно кривошипного валу осі [29].

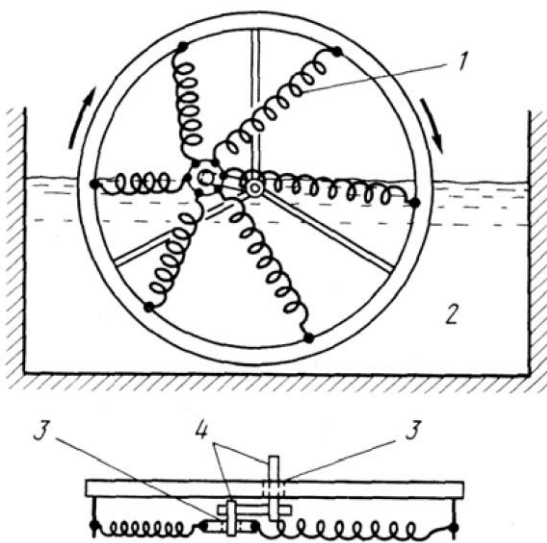


Рис. 1.17. Двигун Гінеля з кривошипно-шатунним механізмом: 1 – спіраль із МПФ; 2 – гаряча вода; 3 – підшипник; 4 – фіксовані осі

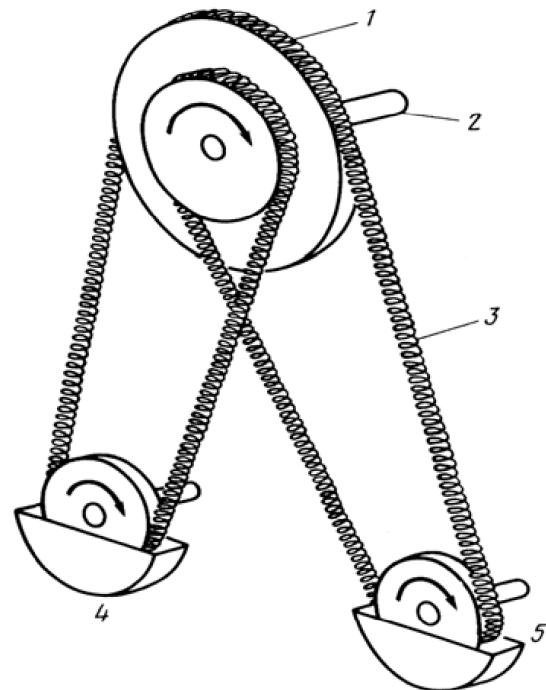


Рис. 1.18. Турбінний двигун Джонсона: 1 – диференціальний шків; 2 – вихідний вал; 3 – безперервна петля з МПФ; 4 – резервуар з холодною водою; 5 – резервуар із гарячою водою

При потраплянні у резервуар з гарячою водою (наприклад, нагрітою сонячною енергією) силовий елемент відновлює вихідну форму, що приводить до повороту шківів. Після виходу з резервуару він охолоджується (досить різниці температур гарячого та холодного середовищ 3–4°C) і під дією надлишкової сили знову деформується. При подальшому повороті шківів силовий елемент знову переміщається у резервуар із гарячою водою і знову відновлює свою форму. У результаті відбувається безперервне обертання. При цьому частота обертання може досягати 60–80 об/хв., а потужність – більше 0,2 Вт.

У турбінних двигунах потужність виникає у результаті механічного з'єднання валів, на яких за допомогою елементів з МПФ виникають крутні моменти (рис. 1.18). Робочим елементом є спіраль зі сплаву TiNi, яка утворює безперервну петлю та проходить через резервуари з гарячою і холодною водою та диференціальний шків. Крутний момент впливає на диференціальний шків унаслідок скорочення спіралі з боку резервуара з гарячою водою. Подовження спіралі у резервуарі з холодною водою приводить до обертання шківів. Різниця крутних моментів на диференціальному шківі зумовлює потужність двигуна. Частота обертання таких двигунів може досягти 700 об/хв. при потужності 0,4–0,5 Вт [29].

У двигунах гравітаційного типу (рис. 1.19) змінюють положення вантажу за допомогою сили, яка збуджується елемента з МПФ, і створюють потужність під дією сили тяжіння вантажу. Тепловий ККД таких двигунів не надто високий, проте їхня конструкція проста, тому їх часто використовують для демонстрації принципу дії теплових двигунів і для виготовлення забавок.

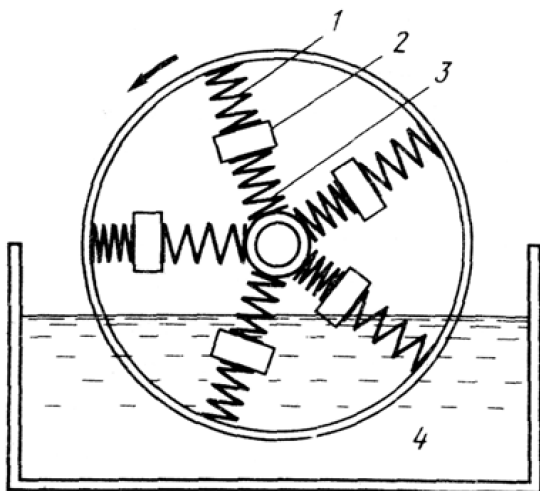


Рис. 1.19. Гравітаційний двигун:
1 – спіраль з МПФ; 2 – вантаж;
3 – пружина зміщення; 4 – гаряча вода

1.3.7. Медичні імплантати та інструменти

Медицина – це найбільш популярна сьогодні область застосування МПФ. Передовсім це стосується сплавів на основі нікеліду титану, які мають високу корозійну стійкість і біологічну інертність. Дуже тривалий період часу були сумніви щодо можливості використання нікеліду титану як матеріалу для імплантатів, позаяк у ньому є більше 50 % нікелю токсичного елемента який викликає алергію, як, наприклад, при використанні нержавіючої сталі, що містить близько 8 % нікелю. Але численні дослідження показали, що нітінол біологічно інертний, і якогось

значного виходу іонів нікелю не відбувається. Річ у тому, що нікелід титану є інтерметалідною сполукою, де атоми нікелю і титану міцно пов'язані між собою, і їхня дифузійна рухливість сильно обмежена. У нержавіючих сталях нікель входить до складу твердого неупорядкованого розчину і досить легко переміщається у кристалічній ґратці та виходить за межі імплантату. Крім того, імплантати з нікеліду титану самопасивуються щільною плівкою TiO_2 зі структурою анатазу, що перешкоджає корозії та дифузії через себе іонів нікелю. Але необхідно пам'ятати, що висока біосумісність характерна для однорідних за складом сплавів, які не піддаються в організмі зношуванню від контакту з іншими матеріалами. Тому дуже важливо є дотримання технології виробництва сплаву та правил проєктування конструкції імплантату та його використання у медичній практиці. На жаль, ця вимога не завжди дотримується, і часто застосовуються імплантати з нікеліду титану, отримані високотемпературним синтезом, в якому дуже висока неоднорідність хімічного складу (крім нікеліду титану може містити і чистий нікель). Контакт імплантату з нікеліду титану з нержавіючою сталлю або кобальтовим сплавом, що приводить до утворення гальванічної пари та інтенсивної корозії, також не допускається. Сьогодні проводяться роботи зі зниження цих негативних явищ, наприклад, за допомогою захисних покриттів імплантатів та інших видів обробки поверхні.

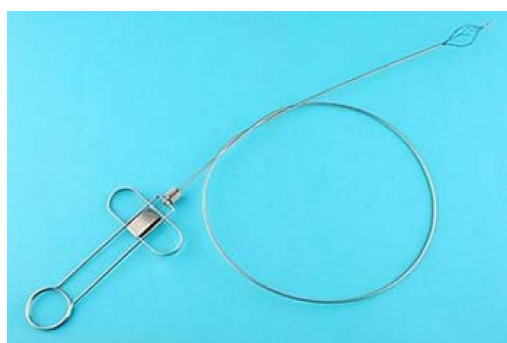
З нікеліду титану виготовляють надпружні інструменти та імплантати, які особливо широко використовуються в ендovasкулярній хірургії. У цьому випадку імплантат або інструмент поміщають у катетер малого діаметра і за допомогою ендоскопа через артерію або інший порожнистий орган доставляють до місця хірургічного втручання. Конструкцію з нікеліду титану виштовхують у порожнистий орган, де він за рахунок надпружності прагне набути вихідної форми. Прикладом таких конструкцій можуть бути стенти, що мають форму циліндра, які розширюють область судини перекритої склеротичною бляшкою і відновлюють потік крові (рис. 1.20, а). Аналогічно функціонує літоекстрактор, за допомогою якого видаляють каміння із сечоводу та нирок (рис. 1.20, б, в). Для цього після проходження катетером каменю з нього виводять пастку у вигляді сітки, в яку при виведенні катетера потрапляє камінь, його видаляють із організму [7, 30].



а)



б)



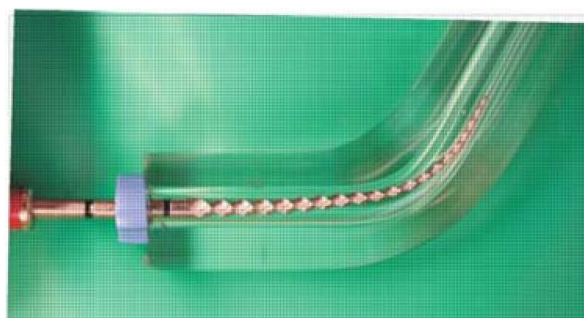
в)



г)



д)



е)

Рис. 1.20. Приклади використання МПФ у медичних імплантатах та інструментах: а) дилатуючі стенти для судин та порожнистих органів; б) доставка стентів; в) літоекстрактор для видалення каміння; г) ортодонтичні дуги у складі брекет-системи

Ефективно використовують дротові елементи для виправлення прикусу зубів. Елементу надається вихідна форма у вигляді анатомічно правильної дуги, яка кріпиться до зубів за допомогою брекетів (рис. 1.20, г). Прагнучи надпружно повернутися до своєї вихідної форми, дротяний елемент поступово і атравматично виводить зуби у правильне положення. Прикладом використання нікеліду титану для виготовлення медичних інструментів можуть

бути стоматологічні надпружні бури для свердління та обробки викривлених зубних каналів (рис. 1.20, д, е).

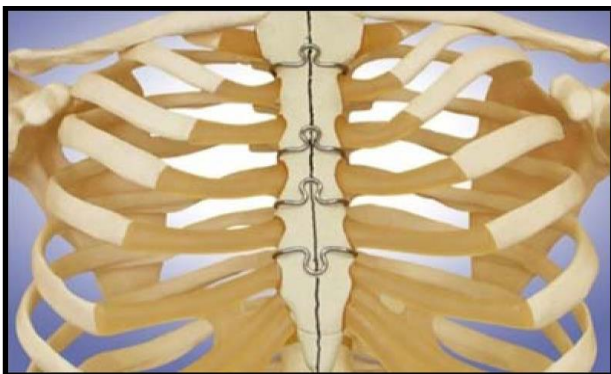
В останні кілька років почали застосовуватися імпланти з нікеліду титану для кріплення кісткових фрагментів (остеосинтезу), заміщення зв'язково-хрящових структур хребта та виправлення деформацій опорно-рухового апарату людини. У цих випадках імплантат повинен спричиняти певний силовий вплив на структуру організму та найчастіше виконувати опорні функції. Тому їх установка неможлива в стані надпружності, оскільки вимагає значних зусиль лікаря і стає травмонебезпечною. У цьому випадку необхідно використовувати ефект пам'яті форми, причому температура відновлення форми має бути $35 \pm 1^\circ\text{C}$. Тільки в тому випадку лікар матиме достатній резерв часу для встановлення охолодженого і деформованого імплантату, а відновлення вихідної форми стимулюватиметься теплом людського тіла. На цьому принципі ґрунтується виробництво фіксаторів для динамічної стабілізації хребта, остеосинтезу груднини, пластини для виправлення лічкоподібної деформації грудної клітки тощо (рис. 1.21) [7].



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 1.21. Застосування МПФ у медичних виробках різного призначення: а-б) фіксатори динамічної стабілізації хребта; в) фіксатори для остеосинтезу грудини; г) фіксатори для остеосинтезу кісток черепа; д) пластина для виправлення лійкоподібної деформації грудної клітки.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИВЧЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЕФЕКТОМ ПАМ'ЯТІ ФОРМИ

2.1. Практична робота

«Дослідження матеріалів з пам'яттю форми»

Мета роботи

Дослідити властивості матеріалів з пам'яттю форми, зокрема зміну форми під впливом теплових стимулів, і визначити їхнє можливе застосування у різних галузях.

Обладнання та матеріали:

1. Зразок сплаву з пам'яттю форми (наприклад, нітінол).
2. Зразок полімеру з пам'яттю форми.
3. Термічна ванна або посудина для нагрівання води.
4. Вода (з температурою 70–80°C).
5. Термометр.
6. Пінцет.
7. Лінійка або штангенциркуль.
8. Звичайна вода кімнатної температури.
9. Блокнот і ручка для записів.
10. Захисні окуляри та рукавички.

1. Короткі теоретичні відомості

Матеріали з пам'яттю форми (Shape Memory Materials, SMM) – це клас матеріалів, які можуть змінювати форму під впливом зовнішніх стимулів, таких як температура, магнітне поле або світло. Вони повертаються до початкової форми, коли стимул усувається або змінюється [31].

Типовим представником цього класу є нітінол (сплав нікелю та титану) – найвідоміший метал з пам'яттю форми, який широко застосовуються у медицині (стенти, ортодонтичні апарати), а також в авіації та робототехніці. Полімери з пам'яттю форми (SMP) використовуються у текстильній промисловості та для виготовлення адаптивних пристроїв.

2. Порядок виконання роботи

1. Підготовка

- Надягніть захисні окуляри та рукавички.
- Підготуйте термічну ванну, наповнивши її гарячою водою (70–80°C).
- Виміряйте початкові розміри зразків (сплаву і полімеру) з пам'яттю форми, використовуючи лінійку або штангенциркуль. Запишіть результати у табл. 2.2.

2. Спостереження за зміною форми нітінолу

- Зігніть зразок сплаву (нітінолу) у нову форму (наприклад, вигнуту лінію або криву).
- Помістіть зразок у термічну ванну з гарячою водою за допомогою пінцета.
- Спостерігайте за зміною форми нітінолу.
- Зафіксуйте час, за який зразок повернеться до своєї початкової форми.
- Виміряйте розміри зразка після нагрівання та повернення до початкової форми. Запишіть дані у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Результати експериментального дослідження

Зразок	Початкові розміри (мм)	Форма після деформації	Час повернення до початкової форми (с)	Розміри після нагрівання (мм)
Нітінол				
Полімер				

3. Спостереження за зміною форми полімеру з пам'яттю форми

- Виконайте попередні кроки для полімерного зразка з пам'яттю форми.
- Зігніть полімер у нову форму і занурте його в гарячу воду.
- Спостерігайте за зміною форми полімеру та запишіть час і результати спостережень.
- Виміряйте розміри полімерного зразка після нагрівання та повернення до початкової форми. Запишіть дані у табл. 2.1.

4. Порівняння результатів

- Помістіть зразки у воду кімнатної температури і спостерігайте, чи відбувається повернення до початкової форми без нагрівання.
- Зробіть висновки про відмінності у властивостях сплавів і полімерів з пам'яттю форми.

3. Питання для обговорення

1. Яка була швидкість повернення до початкової форми для кожного зразка?
2. Як температура впливала на швидкість та ефективність зміни форми?
3. Чи були помітні відмінності між сплавом нітінолу та полімером з пам'яттю форми?
4. У яких реальних застосуваннях можна використовувати досліджені матеріали?
5. Які додаткові фактори могли б вплинути на поведінку матеріалів з пам'яттю форми?

4. Висновок

Опишіть, що було встановлено під час лабораторної роботи. Порівняйте результати між різними типами матеріалів з пам'яттю форми і зазначте їх можливі застосування у реальних умовах. Розгляньте можливості для подальших досліджень, які могли б поліпшити розуміння поведінки цих матеріалів у різних умовах.

5. Зауваження з техніки безпеки

- Використовуйте захисні окуляри та рукавички під час роботи з гарячою водою.
- Будьте обережні при роботі з нагрівальними приладами та гарячими предметами.
- Не допускайте перегрівання води, щоб уникнути опіків.

2.2. Практична робота

«Дослідження термодеоформаційних кривих ε - T сплаву з ефектом пам'яті форми»

Мета роботи

Визначення накопичуваної та зворотної деформації, генерованих напружень і характеристичних температур перетворень сплаву з ефектом пам'яті форми; вивчення та дослідження термодеоформаційних кривих ε - T .

Обладнання та матеріали:

- зразок сплаву з пам'яттю форми (наприклад, нітінол);
- балка круглого перетину діаметром 2,0 мм і завдовжки 35 мм;
- установка триточкового згинання балки;
- термопара хромель-копел;
- джерело живлення;
- нагрівач;
- вольтметр.

1. Короткі теоретичні відомості

Матеріали з ефектом пам'яті форми є прототипами так званих «інтелектуальних» матеріалів майбутнього. «Інтелектуальні» матеріали, крім звичайних, наприклад, для металів – механічних властивостей, властивих традиційним матеріалам, мають також функціональні властивості. Одним із наборів функціональних властивостей є властивості датчика (сенсора) – властивість, яка дає змогу матеріалу реагувати на зміну довкілля; якості процесора, тобто можливість оцінити ситуацію і зробити висновки і, нарешті, виконавчу властивість (актуатор), при якій матеріал здійснює дію або подає сигнали.

Ефект пам'яті форми металів – це фізичне явище, у якому пластично деформований метал відновлює початкову форму, зазвичай при нагріванні. Так, наприклад, якщо взяти звичайний металевий дріт і пластично вигнути його, то ніяким іншим шляхом, крім знову деформувати його у зворотному напрямку, не повернути його початковий стан. Що відбувається з дротом, який має ефект пам'яті форми? Ефект пам'яті форми продемонстровано на рис. 2.1 [31, 32].

Ефект пам'яті форми задається дроту (прутку) спеціального металу за високої температури (рис. 2.1, *a*). Після його охолодження з високотемпературного стану, який називається аустенітним (рис. 2.1,

a), одержують охолоджений стан металу (рис. 2.1, b), який називається мартенситом. Для металевих сплавів відмінність цих станів полягає у відмінності кристалічних ґраток, при цьому обидва стани є стабільними за відповідних температур [32].

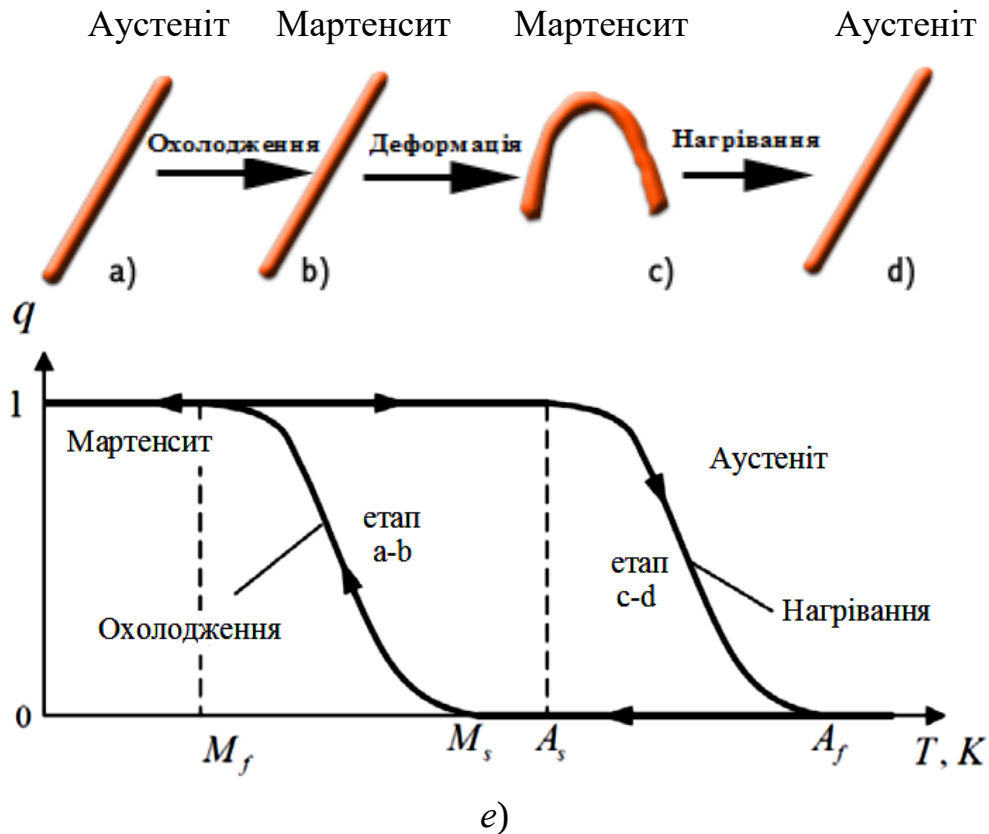


Рис. 2.1. Схема деформації стержня з ефектом пам'яті форми (a-d) та залежність об'ємної долі мартенситу q від температури T (e)

У мартенситному стані дріт легко пластично деформується (рис. 2.1, c). Тепер, якщо дріт нагріти, перевести в аустенітний стан (рис. 2.1, d), то він «згадає» свій початковий стан, наданий йому за високої температури. При цьому вся пластична деформація (відновлювана пластична деформація є заданою для кожного матеріалу з ефектом пам'яті форми) зникне, а зразок може виконати достатню механічну роботу, наприклад, підняти вантаж або привести в дію вихідну ланку механічного пристрою. Такий процес називається прямим і зворотним мартенситним перетворенням у матеріалі при термоциклюванні, відповідно при охолодженні та нагріванні матеріалу [32].

Кінетика мартенситних перетворень має яскраво виражений гістерезис (рис. 2.1, e). Якщо матеріал охолоджується з аустенітного стану, то спочатку якихось фазових перетворень не відбувається.

Однак починаючи з деякої характеристичної температури, яку прийнято позначати M_s , появляються перші кристали мартенситу, внаслідок чого збільшується і доля мартенситної фази в об'ємі матеріалу. З подальшим охолодженням їхні розміри і кількість збільшуються, доки кристали не заповнять при температурі M_f весь об'єм. Таке перетворення називається прямим і при наявності зовнішнього навантаження супроводжується появою великої деформації (ефект пластичності перетворення). При наступному нагріванні, після подолання температури A_s мартенсит починає переходити в аустеніт. При цьому накопичена деформація повільно зникає доти, доки температура не стане вищою A_f і не відбудеться відновлення форми. Температури мартенситних перетворень сильно залежать від хімічного складу сплавів, їх термічної та механічної обробки. Так, у випадку різноатомного нікеліду титану характерні температури лежать у межах 30–80°C, рідко виходячи за цей інтервал. Однак додавання всього лише 3 % заліза знижує їх приблизно на 150–200°C, тобто до –170...–70°C. Водночас легування золотом, паладієм або платиною значно підвищує температуру перетворень – в останньому випадку до 800°C і вище. Механічне напруження близько 500 МПа підвищує температуру перетворень у сплавах титан-нікель і мідь-алюміній-нікель приблизно на 100°C, але у сплавах мідь-марганець це збільшення не перевищує кількох градусів. Отже, що умови перетворення можуть бути змінені в необхідних межах за рахунок варіацій термомеханічних або хімічних факторів.

Цей принцип закладений при проектуванні сучасних технічних пристроїв з використанням сплавів з ефектом пам'яті форми для створення малогабаритних приводів і пристроїв, здатних розвивати порівняно великі зусилля і моменти. Для проектування таких пристроїв необхідно насамперед знати параметри сплаву з ЕПФ, а саме:

- деформацію чи величину переміщення металу з пам'яттю при мартенситних перетвореннях;
- напруження, яке генерується сплавом, або можливе зусилля для здійснення механічної роботи;
- характеристичні температури або інтервал початку та кінця мартенситних перетворень;
- швидкість протікання мартенситних перетворень;
- циклічну міцність чи кількість циклів спрацьовування тощо.

2. Опис етапів практичної роботи

2.1. Завдання практичної роботи

Завдання роботи полягає у визначенні таких основних параметрів сплаву з ЕПФ, як накопичувана та зворотна деформація (ε), генеровані напруження (s), а також характеристичні температури перетворень (T). Результати проведених випробувань, які характеризують ефект пам'яті форми досліджуваного сплаву з ЕПФ, мають бути отримані у вигляді залежностей деформації зразків від температури для різних значень діючого напруження (навантаження на зразок). Типова термодеоформаційна крива ε - T , для одного зі значень прикладеного напруження, наведена в демонстраційному показі та на рис. 2.2, а для монокристалічного сплаву CuAlNi. Точки перегину графіка визначають характеристичні температури початку і кінця перетворень [32].

Величина максимальної деформації $\varepsilon_{\max}$ (що відповідає максимальному прогину балки), яка відповідає ефекту пластичності перетворення, для різних напружень зображена на рис. 2.2, б. Як бачимо, вже невелике напруження (навантаження на зразок) призводять до накопичення великих (прогинів) деформацій (5–8%). При напруженнях від 50 МПа і більше простежується тенденція до насичення, темп приросту деформації значно зменшується і в широкому діапазоні напружень деформація пластичності перетворення перебуває у межах 9–10 %.

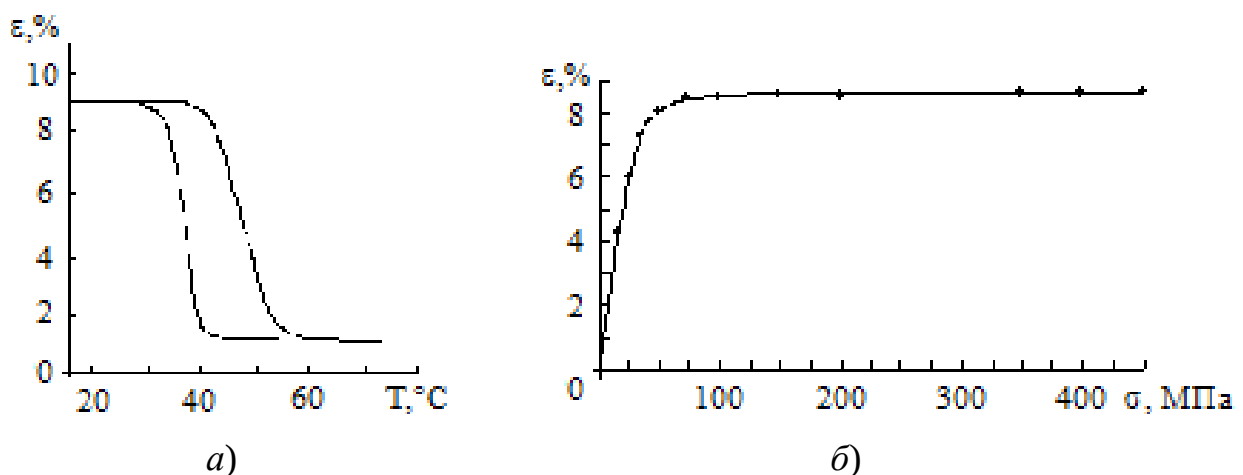


Рис. 2.2. Типова термодеоформаційна крива ε - T для сплавів з ЕПФ

Варто зазначити, що напруження, яке генерується, впливає на температури прямого і зворотного мартенситного перетворення. Так,

для сплаву CuAlNi зі збільшенням напруження спостерігається усунення характеристичних температур перетворення у бік вищих значень. Досліджені особливості зміни характеристичних температур перетворень під впливом напруження необхідно враховувати при створенні конструкцій із силовими елементами, які мають ЕПФ.

2.2. Об'єкт практичної роботи

Об'єктом практичної роботи є сплав з ефектом пам'яті форми. Найбільш перспективними сплавами з ЕПФ є сплави TiNi, CuAlNi, CuZnAl.

Для цієї роботи можна взяти зразки або полікристалічного TiNi або монокристалічного CuAlNi.

2.3. Опис установки та способи вимірювання параметрів

Дослідження параметрів сплаву з ефектом пам'яті форми проводиться методом триточкового згинання. Зразки сплаву з ЕПФ мають вигляд балки (прутка) круглого перетину діаметром 2,0 мм і завдовжки 35 мм. Балка опирається на дві опори, відстань між опорами – 20 мм. На балку у середній частині зразка на рівних відстанях від опор прикладається навантаження, навішуванням на зразок вантажів потрібної ваги. Для вимірювання температур безпосередньо до зразка кріпиться термopара хромель-копель.

Дослідження виконується у режимі фіксованого навантаження на зразок. Навантаження передається на нього за допомогою тонкого стрижня з прорізом, у який поміщається зразок. Цей стрижень механічно зв'язаний з датчиком переміщення вимірювальної системи. Таким чином, зміна прогину при згинанні зразка під дією навантаження, фіксується датчиком, і дані передаються на його блок управління.

Нагрівання зразка здійснюється пропусканням струму від джерела живлення через нагрівач, виготовлений з ніхромового дроту, намотаного на керамічний ізолятор, в який поміщено деформований зразок. Напруга термо-ЕРС з термopари фіксується вольтметром.

1.4. Визначення основних параметрів – напруження, деформація та температура.

Напруження s та деформація ε розраховуються для зовнішнього волокна зразка в точці прикладання навантаження за формулами:

$$s = \frac{3Pl_0}{d^3} \text{ [Па]}, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{4fd}{4f^2 + l_0^2} \cdot 100\% [\%], \quad (2)$$

де d – діаметр зразка [м],

l_0 – відстань між опорами [м],

f – прогин зразка [м],

P – навантаження [Н].

Охолодження зразка під постійним напруженням в інтервалі температур від 100°C до 20°C супроводжується інтенсивним накопиченням деформації (збільшення прогину балки). Процес починається при деякій температурі $M_{\text{П}}$ і закінчується при температурі $M_{\text{К}}$. Нагрівання зразка під аналогічним напруженням супроводжується зворотним процесом – практично повним відновленням накопиченої на стадії охолодження деформації (ефект пам'яті форми). Деформація починає повертатися при деякій температурі $A_{\text{П}}$ і закінчується повернення при температурі $A_{\text{К}}$. Температури прямого та зворотного перетворення ($M_{\text{П}}$, $M_{\text{К}}$, $A_{\text{П}}$, $A_{\text{К}}$) при термоциклюванні при різних напруженнях s визначаються методом дотичних (точки перегину графіка рис. 2.2, а). Проводиться дослідження залежності величини деформації перетворення від значення прикладеного напруження.

1.5. Методика проведення практичної роботи

1. Перевірка правильності експериментальної установки та задання початкових параметрів.

2. Навантаження балки першим (найбільшим) навантаженням P_1 (діапазон заданих навантажень від 300 грам (3 Н) до 3000 грам (30 Н). визначення s_1 для заданого P за формулою (1).

3. Зміна температури T (нагрівання до 100°C та охолодження до 20°C) навколишнього середовища (пічки) і її вимірювання за допомогою термopар. Вимірювання проводити в не менше ніж 10 точках при нагріванні та 10 точках – при охолодженні.

4. Вимірювання прогину f балки.

5. Визначення деформації ε за формулою (2).

6. Визначення деформації ε_{max} для s_1 .

7. Побудова графіка ε в залежності від температури T для s_1 .

8. Визначення характеристичних температур мартенситних перетворень ($M_{\text{П}}$, $M_{\text{К}}$, $A_{\text{П}}$, $A_{\text{К}}$) для s_1 .

9. Повторення експерименту для цього навантаження.

10. Навантаження балки наступним вантажем P_2 , більшим від P_1 .

11. Повторення пп. 2-8.
12. Навантаження вантажем P_3 , більшим від P_2 .
13. Повторення пп. 2-8.
14. Всього використати 5 вантажів P (п'ять значень s).
15. Зведення всіх графіків залежності ε від температури T (пп. 7) для п'яти різних s на один.
16. Побудова графіка $\varepsilon_{\max}$ в залежності від п'яти s (пп. 6).
17. Побудова графіка залежності характеристичних температур T для всіх s (пп. 8).

1.6. Підсумковий звіт

Результатами практичної роботи є:

1. Графік залежності деформації ε залежно від температури T для п'яти значень s (на одному графіку має бути п'ять термодеоформаційних кривих ε - T для різних значень прикладеного напруження).
2. Графік залежності $\varepsilon_{\max}$ від значень s .
3. Графік зміни характеристичних температур мартенситного перетворення залежно від значень s . Можливе використання таблиць для заповнення параметрів під час практичної роботи, наприклад:

Таблиця 2.2

Величини накопичення ($\varepsilon_{\max}$) та залишкової деформації ($\varepsilon_{\text{зал}}$) залежно від заданого діючого напруження s і номера досліду

№ досліду	σ , МПа	$\varepsilon_{\max}$, %	$\varepsilon_{\text{зал}}$, %
1			
2			
...			

Таблиця 2.3

Величини характеристичних температур мартенситного перетворення залежно від заданих значень σ та номера досліду

№ досліду	σ , МПа	$M_{\text{П}}$, °C	$M_{\text{К}}$, °C	$A_{\text{П}}$, °C	$A_{\text{К}}$, °C

Висновки

Основними результатами практичної роботи є:

1. Визначення величини оборотних та залишкових деформацій.
2. Дослідження впливу діючих напружень на величину фазової пластичності при термоциклюванні через інтервал мартенситного перетворення.
3. Проведення досліджень впливу механічних напружень на характеристичні температури мартенситних перетворень.

2.3. Завдання для самоконтролю та закріплення знань

2.3.1. Контрольні запитання

1. У яких галузях народного господарства та у яких технічних пристроях можна використовувати МПФ?
2. За якими ознаками можна класифікувати пристрої з ЕПФ?
3. Наведіть приклади використання конструкцій, що трансформуються, з МПФ.
4. Поясніть принцип роботи термомеханічних з'єднань із МПФ.
5. За якими критеріями треба обирати матеріал для термомеханічних з'єднань?
6. Які особливості збирання трубопроводів муфтами з матеріалу з пам'яттю форми?
7. Поясніть принцип роботи термосилових виконавчих елементів із МПФ.
8. Поясніть принцип роботи температурних датчиків і терморегуляторів із МПФ.
9. Наведіть приклади використання МПФ у медицині.
10. Які переваги мають імплантати з МПФ?
11. У чому різниця між імплантатами з конструкційних матеріалів та імплантатами з МПФ?
12. Назвіть характеристики працездатності імплантатів із МПФ.

2.3.2. Тестові завдання

1. *Що таке інтелектуальні матеріали з ефектом пам'яті форми?*
 - а) Матеріали, які змінюють свою форму під впливом температури.
 - б) Матеріали, які змінюють колір під впливом світла.
 - в) Матеріали, які відновлюють початкову форму після деформації під впливом температури або інших стимулів.
 - г) Матеріали, які є прозорими при нагріванні.
2. *Яка основна характеристика матеріалів з ефектом пам'яті форми?*
 - а) Висока міцність.
 - б) Здатність відновлювати початкову форму після нагрівання.
 - в) Стійкість до хімічних речовин.
 - г) Здатність проводити електрику.

3. Який з наведених матеріалів належить до групи інтелектуальних з ефектом пам'яті форми?

- a) Полівінілхлорид (ПВХ).
- b) Нітінол (сплав нікелю і титану).
- c) Поліетилен.
- d) Мідь.

4. У якому році вперше було відкрито ефект пам'яті форми у металів?

- a) 1932 р.
- b) 1963 р.
- c) 1970 р.
- d) 1985 р.

5. Який принцип покладено в основу роботи матеріалів з пам'яттю форми?

- a) П'єзоелектричний ефект.
- b) Зміна кристалічної структури при зміні температури.
- c) Електропровідність.
- d) Феромагнетизм.

6. Як називається сплав, який найчастіше використовується для виготовлення матеріалів з ефектом пам'яті форми?

- a) Сталь.
- b) Алюміній.
- c) Нітінол.
- d) Бронза.

7. У яких галузях застосовуються інтелектуальні матеріали з ефектом пам'яті форми?

- a) Авіаційна та космічна промисловість.
- b) Медицина.
- c) Робототехніка.
- d) Усі вищезазначені.

8. Яка з наведених властивостей не є характерною для матеріалів з пам'яттю форми?

- a) Біосумісність.
- b) Стійкість до ультрафіолетового випромінювання.

- c) Здатність до пластичної деформації без руйнування.
- d) Відновлення форми при охолодженні.

9. Який матеріал з ефектом пам'яті форми використовується у медицині для виготовлення стентів?

- a) Поліпропілен.
- b) Нітінол.
- c) Золото.
- d) Силікон.

10. Які стимули можуть викликати зміну форми в інтелектуальних матеріалах з ефектом пам'яті?

- a) Світло.
- b) Температура.
- c) Електричне поле.
- d) Усі вищезазначені.

11. Як називаються полімери, які мають ефект пам'яті форми?

- a) Термопласти.
- b) Еластомери.
- c) Полімери з пам'яттю форми (SMP).
- d) Силіконові гелі.

12. Які проблеми розв'язують матеріали з пам'яттю форми у авіабудуванні?

- a) Зниження ваги конструкцій.
- b) Підвищення аеродинамічної ефективності.
- c) Автоматичне усунення дефектів.
- d) Усі вищезазначені.

13. Чому матеріали з пам'яттю форми ефективні у виготовленні ортодонтичних пристроїв?

- a) Мають високу стійкість до корозії.
- b) Здатні відновлювати свою форму, що полегшує корекцію зубів.
- c) Мають низьку вартість.
- d) Усі вищезазначені.

14. Який із зазначених матеріалів може використовуватися для створення змінних крил літаків?

- a) Нітінол.
- b) Поліестер.
- c) Дюралюміній.
- d) Сталь.

15. У чому полягає особливість роботи інтелектуальних текстильних матеріалів з пам'яттю форми?

- a) Вони можуть самостійно регулювати температуру тіла.
- b) Змінюють колір під впливом тепла.
- c) Вони відновлюють свою форму після нагрівання або розтягування.
- d) Всі вищезазначені.

16. Як називається процес, при якому матеріал з пам'яттю форми повертається до початкової форми?

- a) Мартенситна трансформація.
- b) Аустенітна реакція.
- c) Трансформаційне зворотне перетворення.
- d) Релаксація напруги.

17. Які інтелектуальні матеріали мають потенціал для використання у м'якій робототехніці?

- a) П'єзоелектричні кераміки.
- b) Електроактивні полімери.
- c) Силікони.
- d) Тверді метали.

18. У якому діапазоні температур зазвичай працюють матеріали з пам'яттю форми?

- a) -50°C до 0°C .
- b) 0°C до 100°C .
- c) 100°C до 300°C .
- d) 300°C до 500°C .

19. Яка властивість матеріалів з пам'яттю форми робить їх корисними для виготовлення адаптивних антен?

- a) Здатність до пластичної деформації.
- b) Висока провідність.

- с) Можливість змінювати форму у відповідь на зміну температури.
- д) Низька вартість.

20. Яка головна перевага використання матеріалів з пам'яттю форми у будівництві?

- а) Зменшення витрат на матеріали.
- б) Підвищення енергетичної ефективності будівель.
- с) Самовідновлення у разі механічних пошкоджень.
- д) Поліпшення дизайну і зовнішнього вигляду будівель.

21. Встановіть відповідність між матеріалами та їхніми характеристиками

1. Сплави з ефектом пам'яті форми.	А. Застосовуються для створення сенсорів і актуаторів завдяки високій температурній стабільності.
2. Полімери з ефектом пам'яті форми.	Б. Використовуються у біомедицині завдяки біосумісності та легкості обробки.
3. Керамічні матеріали з пам'яттю форми.	В. Забезпечують сильний механічний зворотний зв'язок при деформаціях.
4. Комбіновані матеріали.	Г. Мають низьку щільність і зручні для створення легкої продукції.
5. Композити з інтелектуальними властивостями.	Д. Поєднують властивості різних матеріалів для досягнення універсальності.

22. Встановіть відповідність між фазами сплавів з ефектом пам'яті форми та їхніми характеристиками

1. Аустенітна фаза.	А. Фаза з високою симетрією, що відповідає початковій формі сплаву.
2. Мартенситна фаза.	Б. Фаза з низькою симетрією, що виникає після деформації.
3. Перехідна зона.	
4. Критична температура.	
5. Псевдопластичність.	

	В. Температурний діапазон, у якому відбувається фазовий перехід. Г. Здатність матеріалу деформуватися без залишкових змін. Д. Температура, при якій починається фазовий перехід.
--	---

23. Встановіть відповідність між напрямками використання інтелектуальних матеріалів та прикладами застосування

1. Аерокосмічна промисловість. 2. Біомедицина. 3. Електроніка. 4. Робототехніка. 5. Будівництво.	А. Протези та пристрої для корекції деформацій. Б. Датчики для виявлення вібрацій у конструкціях. В. Адаптивні поверхні для крил літаків. Г. Актуатори для механічних маніпуляторів. Д. Елементи пам'яті для мікросхем.
--	--

24. Встановіть відповідність між властивостями інтелектуальних матеріалів і фізичними принципами

1. Ефект пам'яті форми. 2. Надпружність. 3. Теплове розширення. 4. П'єзоелектричний ефект. 5. Магнітокалоричний ефект.	А. Зміна форми під дією тепла. Б. Здатність відновлювати форму після сильних механічних деформацій. В. Вироблення електричного заряду під дією механічного тиску. Г. Зміна температури матеріалу під дією магнітного поля. Д. Лінійне збільшення розмірів при нагріванні.
--	--

25. Встановіть відповідність між типами деформацій і їхніми прикладами

1. Односпрямована деформація.	А. Здатність матеріалу повернутися до початкової форми після зняття навантаження.
2. Двонаправлена деформація.	Б. Матеріал зберігає форму після зняття навантаження.
3. Псевдопластична деформація.	В. Матеріал демонструє дві форми залежно від температури.
4. Залишкова деформація.	Г. Деформація, яка залежить лише від одного вектора сили.
5. Пружна деформація.	Д. Відновлення початкової форми після зняття напруги в фазовому переході.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Нітинол. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Нітинол>
2. Початок ери НІТИНОЛУ(NITINOL). URL: <https://ortoline.com.ua/ukrayinski-likari-u-gostyah-u-shvedskogo-brendu/>
3. Мартенсит. URL: <https://esu.com.ua/article-63821>
4. Мартенситне перетворення. URL: https://stud.com.ua/73697/tehnika/martensitne_peretvorenniya
5. Shape Memory Alloys – Processing, Characterization and Applications. / Edited by F.M. Braz Fernandes. Publisher: InTech, 2013. 290 p.
6. Lexcellent C. Shape-memory Alloys Handbook. / Publisher : ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2013. 379 p.
7. Shape Memory Alloy Engineering For Aerospace, Structural and Biomedical Applications / Edited by: L. Lecce and A. Concilio. Publisher : Elsevier Ltd, 2015. 422 p.
8. Фірстов Г.С. Функціональні матеріали з пам'яттю форми: сучасний стан і перспективи використання : за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 21 березня 2018 року. *Вісник НАН України*. 2018. № 6. С. 19–34.
9. Otsuka K. Ren X. Physical metallurgy of Ti-Ni – based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*. 2005. Vol. P. 511-678.
10. Коваль Ю.М. Сплави з ефектом пам'яті форми – потужний клас функціональних матеріалів. *Наука та інновації*. 2005. Т 1. № 2. С. 80–95.
11. Куцова В.З., Носко О.А., Ковзель М.А. Спеціальні сплави, РЗМ та благородні метали : навчальний посібник. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2007. 163 с.
12. Розробка технології отримання гомогенних зливків нікелідів титану із застосуванням магнітокерованої електрошлакової плавки. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/sovele_2017_2_12.pdf
13. Sure G.N., Brown L.C. Preparation and properties of fine grain β -CuAlNi strain – memory alloys. *Metall. Trans.* 1984. 15A. P. 1613-1621.
14. 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.
15. Титанові сплави. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Титанові_сплави#:~:text=titanium%20alloys\)%20-%20сплави%20на%20основі,які%20з%20них%20-%20доброю%20зварністю.](https://uk.wikipedia.org/wiki/Титанові_сплави#:~:text=titanium%20alloys)%20-%20сплави%20на%20основі,які%20з%20них%20-%20доброю%20зварністю.)
16. Nishida M., Wayman C.M., Honma T. Precipitation processes in

- nearequiatomic TiNi shape memory alloys. *Met. Trans. A*. 1986. V. 17A. P. 1505–1515.
17. Титанові сплави. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Титанові_сплави
18. Сплави на основі заліза : підручник / Мазур В.І., Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2013. 500 с.
19. Гапонова О.П., Будник А.Ф. Сталі та сплави з особливими властивостями : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2014. 240 с.
20. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys / T.W. Duerig, K.N. Melton, D. Stoeckel, C.M. Wayman. Butterworth-Heinemann, 1990. 356 p.
21. The shape memory effect. URL: <https://mrkspecialitymaterials.com/pdf/Tech%20Paper%20-%20Shape%20memory%20effect.pdf>
22. Серце, космос і фокуси. URL: <https://tyzhden.ua/sertse-kosmos-i-fokusy/>
23. Інтелектуальні матеріали. URL: https://stud.com.ua/73790/tehnika/intelektualni_materiali
24. Застосування матеріалів з ефектом пам'яті форми. URL: <https://studfile.net/preview/9796366/page:3/>
25. Прикладне матеріалознавство : підручник для вищих навчальних закладів III–IV ступенів акредитації / О.В. Сушко, Е.К. Посвятенко, С.В. Кюрчев, С.І. Лодяков. Мелітополь : ТОВ «Forward press», 2019. 352 с.
26. Сушко О.В., Колодій О.С., Коломоєць В.А. Нові матеріали в машинобудуванні: навчально-методичний посібник до виконання лабораторних робіт. Мелітополь : ТПЦ «Forward press», 2021. 106 с.
27. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство / А.С. Опальчук та ін. Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект-поліграф», 2011. 792 с.
28. Функціональні матеріали та покриття : навчальний посібник / М.О. Азаренков, та ін. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. 202 с.
29. Shape memory materials / W.M. Huang, et all. *Materials today*. 2010. Vol. 13, Iss. 7–8. P. 54–61.
30. Застосування матеріалів з ефектом пам'яті форми для виготовлення медичних виробів. URL: [https://dspace.nuph.edu.ua/bitstream/123456789/11688/1/250\(1\).pdf](https://dspace.nuph.edu.ua/bitstream/123456789/11688/1/250(1).pdf)
31. Shape Memory Alloys. / Edited by C. Cismasiu – Publisher: Sciyo, 2010. 210 p.
32. Miyazaki S., Otsuka K. Development of shape memory alloys. *ISIJ International*. 1989, Vol. 29, № 5. P. 353–377.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

Аустеніт 8

Г

Гравітаційний двигун 31

Д

Двигун Гінеля 31

Двигун Джонсона 31

Двійникування 8, 9, 10, 17

Деформація 8, 9, 10 17, 21, 41, 43

Е

Ефект пам'яті форми 2, 3, 5, 7, 10,
11, 40, 51, 52, 53

М

Мартенсит 7, 8

Мартенситне перетворення 7, 8

Матеріал з пам'яттю форми 38, 51

Н

Напруження 8 10, 42, 43

Нікелід титану 11, 12, 13, 14, 15,
23, 33

Нітінол 33, 38, 51

Т

Температурний датчик 27

Термодеформаційна крива 43

Термомеханічні з'єднання 25

Електронне навчально-методичне видання

Юрій ПАВЛОВСЬКИЙ
Володимир ПОПОВИЧ
Мирослав ПАГУТА

**Сучасні матеріали в техніці: інтелектуальні
матеріали з ефектом пам'яті форми**

Дрогобицький державний педагогічний університет
імені Івана Франка

Редактор
Ірина Невмержицька

Технічний редактор
Ірина Артимко

Комп'ютерний набір
Юрій Павловський

Здано до набору 27.01.2025 р. Формат 60x90/16. Гарнітура Times.
Ум. друк. арк. 3,65. Зам. 4.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка.
(Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготівників та розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5140 від
01.07.2016 р.). 82100, Дрогобич, вул. Івана Франка, 24, к. 203.