

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Фізичний факультет
Кафедра фізики низьких температур

«Допущено до захисту»
В.о. зав. кафедри фізики
низьких температур
проф. Шкловський В.О. _____
«___» грудня 2024 р.

Оцінка «_____»
Голова ЕК _____
«___» грудня 2024 р.

Мирко Віталій Олександрович

**Лабораторна робота з дослідження резонансним методом
температурної залежності
модуля пружності та внутрішнього тертя**

Дипломна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» за спеціальністю 104 – фізика та астрономія освітньо - професійної програми – «фізика».
Науковий керівник: викладач КФНТ
Врагов О.Ю.

Науковий консультант: кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики низьких температур Білецький В.І.

Рецензент: Вчений секретар Інституту фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій ННЦ «ХФТІ» НАНУ,
канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
Пойда А.В.

Анотація

Мирко Віталій Олександрович. Лабораторна робота з дослідження резонансним методом температурної залежності модуля пружності та внутрішнього тертя. – Рукопис.

Дипломна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» за спеціальністю 104 – фізика та астрономія. – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків. – 2024. – с. 35, рис. 6, табл. 1 .

В дипломній роботі наведені короткі відомості про матеріали, в яких спостерігається ефект пам'яті форми, і фізичну природу цього явища. Описані методи досліджень температурної залежності пружних модулів і створені методичні вказівки до впровадження лабораторної роботи для спеціального лабораторного спецпрактикуму для студентів кафедри фізики низьких температур фізичного факультету.

Ключові слова: мартенситні перетворення, ефект пам'яті форми, пружні модулі.

Abstract

Myrko Vitaly Oleksandrovych. Laboratory work on the study of the temperature dependence of the modulus of elasticity and internal friction by the resonance method. – Manuscript.

Thesis for obtaining the educational and qualification level "Master" in specialty 104 – Physics and Astronomy. – V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv. – 2024. – 35 pages, 1 table, 6 figures.

The thesis contains brief information about the materials in which the shape memory effect is observed and the physical nature of this phenomenon. Methods of researching the temperature dependence of elastic modules are described and methodological guidelines are created for the implementation of laboratory work for a special laboratory workshop for students of the Department of Low Temperature Physics of the Faculty of Physics.

Key words: martensitic transformations, shape memory effect, elastic moduli.

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ.....	5
1. Аналітичний огляд літератури з ефекту пам'яті форми.....	8
1.1. Пластичність кристалів і мартенситні перетворення.....	8
1.2. Механічні властивості матеріалів у зв'язку з двійникуванням та мартенситними перетвореннями.....	10
1.3. Пружність матеріалу поблизу температур фазових перетворень.....	12
1.4. Практичне використання ефекту пам'яті форми	13
2. Методики вимірювань модулів пружності.....	16
2.1. Статичні методи.....	16
2.2. Динамічні методи.....	17
3. Лабораторний стенд і методичні вказівки до проведення лабораторної роботи.....	20
3.1. Установка для вимірювання модуля Юнга.....	21
3.2. Завдання до лабораторної роботи.....	32
Висновки.....	33
Список використаної літератури.....	34

Вступ

У добу промислового виробництва засоби керування механічними властивостями металів та сплавів були, в більшості своїй, кустарними. Оптимальні режими термічної обробки та оптимальні хімічні склади сплавів визначали шляхом копіткого експериментального пошуку, причому основою для такого пошуку були скоріш інтуїція та досвід дослідника, ніж повноцінна наукова інформація про структуру металу.

Вплив легування металевих сплавів, а також фазових (структурних) перетворень, що відбуваються при їх термічній обробці, на комплекс механічних властивостей можна достовірно оцінити тільки за допомогою спеціальних приладів і методів вимірювань. На той час такі прилади тільки починали створюватися. Можливість науково обгрунтованого підходу до проблеми покращення механічних властивостей металів з'явилася на початку ХХ століття з розвитком методів структурного аналізу. Було встановлено, що механічні властивості в значній мірі визначаються внутрішньою будовою металу. Вдосконалення експериментальної техніки, використання рентгеноструктурного, а пізніше і електронно-мікроскопічного аналізу дозволило суттєво вточнити основний висновок.

Хоча численні випробування зразків на розтягування, стиснення, вигин, кручення та при інших комбінованих засобах не дозволяють встановити механізм процесів, що відбуваються в металах при їх пластичній деформації та руйнації, ці експериментальні методи продовжують залишатися необхідними та корисними для металофізики.

Слід відзначити, що всі спроби розробити теорію процесів пластичної деформації та руйнування, засновану на уявленні про метал як про суцільне середовище, не призвели до очікуваних результатів. Формальні методи розрахунків на основі будь-якої з відомих теорій міцності не змогли надати задовільного пояснення феноменологічним

проявам процесу пластичної деформації, не говорячи вже про її механізм. Наприклад, при розрахунках, які враховували міжатомні зв'язки в кристалічній ґратці, були отримані значення механічних характеристик, які суттєво відрізнялися (в бік збільшення) від визначених експериментально.

Послідовний розвиток теоретичних уявлень про різного роду дислокаційні механізми пластичності металів, про мікроскопічну дефектну структуру сплавів, уявлення про реальні сплави як багатофазні системи дозволило прийти до таких понять як надпластичність та надміцність. Ці поняття застосовуються до об'єктів, яким притаманні унікальні механічні характеристики порівняно з традиційними конструкційними металічними матеріалами.

До таких унікальних властивостей можна віднести винайдений більше півстоліття тому ефект пам'яті форми сплавів – термопружне перетворення, при якому деформований за певної температури матеріал відновлює первісну форму при підвищенні температури [1–6]. В теперішній час ці матеріали широко застосовуються як в різних галузях техніки (зокрема, в космічному машинобудуванні і військовій техніці), так і в медицині.

Для розуміння механізму, що пояснює такі властивості матеріалів, посеред інших необхідні відомості про температурні залежності модулів пружності. Зокрема, в матеріалах з пам'яттю форми можна очікувати особливість в залежності $E(T)$ поблизу температури виникнення мартенситного перетворення (бездифузійне перетворення в кристалічному твердому тілі за низьких температур, внаслідок яких з його вихідної фази утворюється мартенситна фаза з новою кристалічною ґраткою). В даній дипломній роботі, в якості прикладу, наведено результати досліджень температурної залежності модуля Юнга і внутрішнього тертя Q^{-1} в низці сплавів системи Cu – Al – Ni, яка і пропонується студентам для дослідження в лабораторній роботі. Експериментальні методи визначення

модулів пружності можна поділити на дві групи – статичні та динамічні. В першому випадку модуль пружності визначають шляхом вимірювання постійної пружної деформації, що виникає в зразку за умов прикладання відомої постійної напруги. Недолік статичних методів полягає в тому, що для отримання достатньо точних результатів необхідно прагнути значних деформацій, коли виникає небезпека виходу за межі суто пружної поведінки матеріалу. Динамічні методи визначення модулів пружності дозволяють виконувати вимірювання при малих деформаціях і відрізняються від статичних більш високою чутливістю.

В дипломній роботі наведено короткі відомості про ефект пам'яті форми, методи вимірювань температурних залежностей модулів пружності та надано методичні рекомендації до проведення лабораторної роботи «Вивчення модулів пружності матеріалів з пам'яттю форми» спеціального практикуму з фізики низьких температур для студентів 4 курсу фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.

1. Аналітичний огляд літератури з ефекту пам'яті форми

1.1. Пластичність кристалів та мартенситне перетворення

Властивість деяких металічних пластично деформованих сплавів поновлювати первісну форму при нагріві або в процесі розвантаження прийнято називати ефектом пам'яті форми (ЕПФ). Фізичною основою ЕПФ є мартенситне перетворення (МП) або оборотне двійникування. В залежності від ступеню деформації та типу матеріалу відновлення форми може бути повним або частковим. Повне відновлення форми зазвичай спостерігається в сплавах з термопружним мартенситом. Це системи Cu – Al – (Fe, Ni, Co, Mn), Ni – Al, Au – Cd, Ag – Cd, Ti – Ni (нитинол), In – Tl, Cu – Zn – Al і Cu – Zn – Sn (алюмінієві та олов'яні бронзи) і низка більш складних систем [7, 8]. Фазове перетворення, за якого в вихідному типі кристалічної ґратки зі зниженням температури виникає інший тип ґратки з іншим пакуванням атомів, обумовлений колективним зсувом відносно первісного положення, отримав назву мартенситного і вперше був виявлений в залізі. На теперішній час цей тип фазових перетворень виявлений не тільки в сплавах заліза, але й в чистих металах (наприклад, Ti), сплавах на основі інших металів (мідь, золото, інш.), кераміках, мінералах, неорганічних сполуках, кріокристалах (затверділих газах), полімерах.

Пояснити це явище можна таким чином. Накопичення оборотної пластичної деформації в різних температурних інтервалах для одного і того самого сплаву може здійснюватися різними механізмами. Під дією зовнішніх напруг в інтервалі температур $T_H - T_K$ (H – початок, K – кінець мартенситного перетворення) прямого мартенситного перетворення деформація здійснюється, головним чином, за рахунок макроскопічного зсуву, обумовленого створенням з вихідної фази переважно орієнтованих кристалів мартенситу (так званих голок) – рис. 1.1.

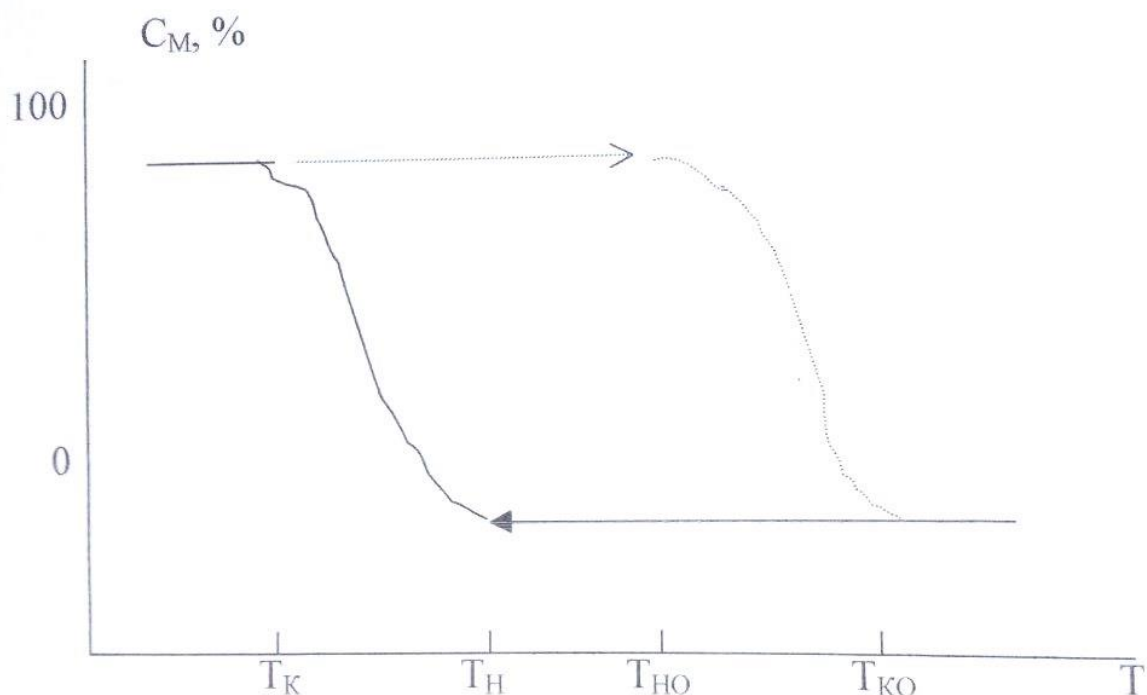


Рисунок 1.1. Фазова діаграма для матеріалів з мартенситним перетворенням. C_M – концентрація мартенситної фази

З усіх можливих варіантів взаємної кристалографічної орієнтації вихідної та мартенситної фаз створюються переважно ті, для яких робота зовнішніх сил має найбільше значення. Коли зразок перебуває в мартенситній фазі за температур нижче T_K , під дією накладених сил відбувається передвійникування мартенситних кристалів та їх переорієнтація. Це призводить до макроскопічної зміни форми. Максимальне величина оборотної пластичної деформації залежить від кристалічної структури вихідної та мартенситної фаз і обмежена величиною деформації ґратки при фазовому переході та зсувами при двійникуванні та передвійникуванні. Наприклад, в нитинолі вона сягає $\sim 9\%$.

При нагріві в інтервалі температур $T_{HO} - T_{KO}$ (НО – початок, КО – кінець) зворотного мартенситного перетворення відновлюється структура та орієнтування кристалів вихідної фази, що супроводжується відновленням макроскопічної форми та розмірів. Для даної системи інтервал температур зворотного мартенситного перетворення, а відповідно і інтервал температур відновлення форми, залежить від складу сплаву і може змінюватися в значних границях при зміні основних та легуючих компонентів. Діапазон температур для різних систем сягає від $\sim 1000^\circ \text{C}$ для сплавів на основі тугоплавких металів до $\sim -200^\circ \text{C}$ на основі мідно-цинкових сплавів. В лабораторній роботі було обрано систему $\text{Cu} - \text{Al} - \text{Ni}$, в якій інтервал перетворення знаходиться поблизу кімнатних температур [9, 10].

1.2. Механічні властивості матеріалів у зв'язку з двійникуванням та мартенситним перетворенням

Діаграми нормального деформування пластичних металів мають порівняно простий вигляд. За пружною ділянкою навантаження OA на діаграмі розтягнення (рис. 1.2 а) відбувається пластичний перебіг, нерідко спочатку з малим деформаційним зміцненням (ділянка AB), а далі – з більш значним. Розвантажування металу в будь-якій точці діаграми, наприклад, на траєкторії CD , викликає усунення в основному пружної деформації так, що лінія CD виявляється паралельною до OA , а на вісі деформацій відрізок OD характеризує залишкову пластичну деформацію. Хоча в кількісному відношенні картина, що описана, залежить від типу напруженого стану і може змінюватися за варіювання температурних, швидкісних та інших умов навантаження, якісно механічна поведінка матеріалу зберігається: за пружною ділянкою слідує область пластичності, розвантаження супроводжується усуненням пружних деформацій і, кінець кінцем, метал завжди набуває деяку залишкову пластичну деформацію,

яку можна усунути лише прямою механічною дією.

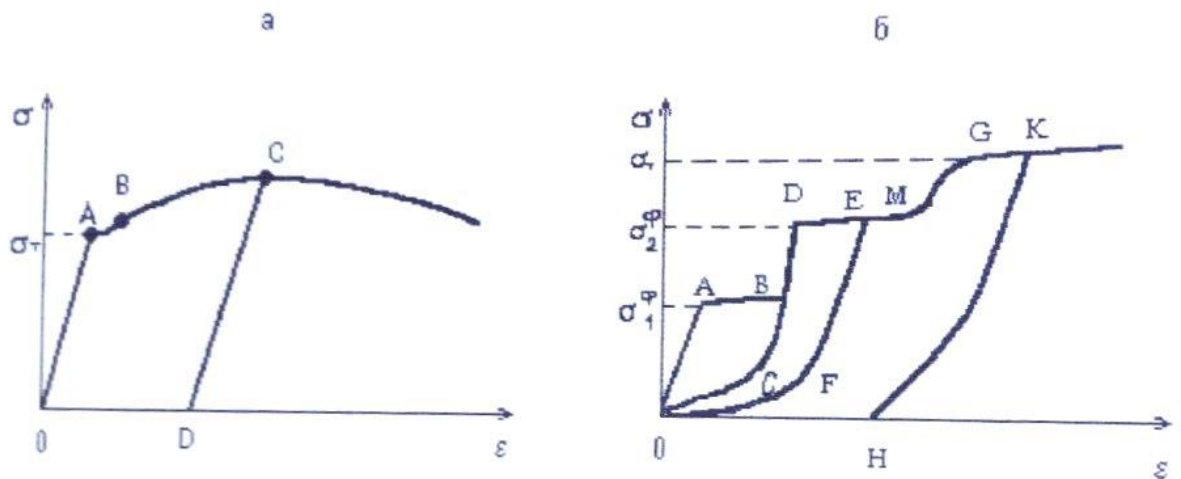


Рисунок 1.2. Схема діаграм деформування:

а) звичайні метали; б) матеріали з мартенситними перетвореннями

Зовсім інший характер механічної поведінки спостерігається у матеріалів в стані фазових перетворень. Якщо температура досліду підібрана належним чином (близька до температури фазового перетворення), діаграми розтягування нерідко мають вигляд, який схематично зображено на рис. 1.2 б. За пружною ділянкою OA зазвичай відбувається перебіг (течія) з дуже малим деформаційним зміцненням на деякому кінцевому проміжку AB, де пластичність обумовлена наявним мартенситним перетворенням або двійникуванням, а далі деформація металу знову відбувається за пружним законом (BD). В низці сплавів, наприклад у монокристалів CuAlNi визначених орієнтацій, точці D відповідає суцільне крихке руйнування. Розвантаження на будь-якому етапі лівіше за точку D спочатку відбувається за пружним законом, наприклад, на відрізьку BC, а потім – за специфічною траєкторією CO аж

до повного зникнення деформації. В інших випадках, наприклад, у нікеліді титана, правіше від точки *D* відбувається звичайна дислокаційна пластична течія. Накопичена при цьому додаткова непружна деформація при розвантаженні, звичайно ж, не зникає. Врешті решт, буває і так, що після точки *D* реалізується стадія течії *DM*, яка за механізмом пластичності аналогічна стадії *AB*. Правіше від *M* на ділянці *MG* метал знову деформується пружно, а далі – пластично по дислокаційному каналу. Розвантаження на «майданчику» *DM* відбувається зазвичай вздовж *EFO*, а розвантаження з ділянки пластичної течії *GK* – вздовж *KN* з обов'язковою залишковою деформацією *OH*. Відзначимо, що навіть у випадках, коли деформація при розвантаженні повністю зникає, траєкторія розвантаження зазвичай відрізняється від траєкторії навантаження, наприклад за кількістю «майданчиків», що з'являються.

1.3. Пружність матеріалу поблизу температур фазових перетворень

Діаграми деформування матеріалів з мартенситними перетвореннями мають низку особливостей, які відрізняються від діаграм звичайних металів. Хоча у останніх можна знайти схожі криві навантаження з двома або більше границями плинності, наприклад, при деформування монокристалів з декількома системами двійникування, проте багатостадійний характер розвантаження, що у багатьох випадках супроводжується до того ж повним вороттям деформації, є типовим виключно для сплавів першого типу. Здатність цих матеріалів відновлювати вихідну деформацію при видаленні зовнішньої сили в ізотермічних умовах називають ефектом псевдопружності. В літературі зустрічаються і такі назви, як надпружність, над еластичність, гумоподібна пружність і таке інше. Діапазон оборотних макродеформацій в залежності від конкретних умов є дуже широким – від величин, близьких до пружних деформацій, до 30%, як, наприклад, в монокристалах CuZnAl .

Пружні властивості кристалів зазвичай характеризуються модулем пружності E та модулем зсуву $C' = (C_{11} - C_{12})/2$, C_{44} , G і так. інш., оцінюючи їх або за нахилом лінійної ділянки діаграми деформування, або за власною частотою коливань матеріалу f .

В сплавах з мартенситними перетвореннями поблизу температури перетворень спостерігаються аномальні зміни як модулів, так і частоти f . Величина модуля пружності E за даними статичних випробувань не залежить від виду навантаження і для більшості матеріалів розглянутого типу є на порядок нижчою, ніж у звичайних металів; найчастіше $E = (0.7 - 1.0) \times 10^3$ МПа. Відносне зменшення величини модуля пружності під час фазового переходу складає до 25% та більше порівняно з модулем E аустеніта. На температурній залежності резонансної частоти вільних коливань у динамічних методах - f практично у всіх сплавів в інтервалі перетворень спостерігаються глибокі провалля, величина яких визначається складом матеріалу, попередньою термо- та термомеханічною обробкою, а також низкою інших факторів. Загальною для більшості матеріалів є наступне: високі модулі пружності аустеніта та більш низькі – мартенсіта; від'ємний температурний коефіцієнт пружних сталей при низьких температурах і додатний при високих; різкий перехід від низького модуля пружності до більш високого у монокристалів і більш плавний – у полікристалів.

Аномальні зміни резонансної частоти коливань зразків, модулів нормальної пружності та модулів зсуву свідчать про те, що поблизу температур мартенситних перетворень вихідна ґратка набуває нестійкості, в результаті чого супротив зсуву різко зменшується і стає можливим мартенситний перехід.

1.4. Практичне використання ЕПФ

Матеріали з ефектом пам'яті форми набули доволі широкого розповсюдження в техніці та медицині як зручні термосилові конструкційні елементи. Розглянемо декілька застосувань цих матеріалів [11 – 13].

а) В космічних апаратах можна компактно розмістити антени, сонячні батареї та інші елементи конструкцій, які на орбіті під дією нагріву випромінюванням Сонця набудуть необхідну, задану на Землі форму (це приклад «високотемпературного» сплаву з ЕПФ).

б) Надпружність можна використовувати, наприклад, для надійного і прямого з'єднання двох трубок. Муфта з низькотемпературного сплаву ЕПФ охолоджується, збільшується в діаметрі (наприклад, на 5 – 7 %) таким чином, що її внутрішній діаметр стає на 3 – 4% більше зовнішнього з'єднувальних трубок. Кінці трубок вводяться в холодну муфту. Після відігріву до кімнатної температури муфта зменшується в розмірах і, завдяки надпружності, надійно стискає кінці трубок. В літаках, на кораблях і космічних ракетах такі з'єднання широко застосовуються в різноманітних трубопроводах. Вони надійніші за сварні з'єднання, що, до того ж, не завжди і не всюди технологічно можливі.

в) Простим і надійним пристроєм при гасінні пожеж є клапан зі сплаву з ЕПФ у вогнегасниках, що спрацьовує при підвищенні температури до певного значення (наприклад, вище 100° С).

г) Використовують можливості сплавів з ЕПФ в медицині (особливо перспективним через його хімічну стійкість виявляється нітінол). При переламі кісток охолоджений фіксатор зі сплаву з ЕПФ вставляють в отвори, просвердлені з обох боків переламу. Під дією тепла (36,6° С) фіксатор стискається і стягує кістки до стикування.

Ці самі властивості сплавів можна використовувати при лікуванні сколіоза – викривлення хребта. Охолоджений стрижень (радше проволочку

невеликого перерізу) деформують так, щоби вона прийняла точну форму «неправильного» хребта. Далі оперативно вводять підготовлену проволоку до тіла, щільно скріплюючи з хребтом. Під дією тепла людського тіла проволока намагається повернути первісну форму і тягне хребці в потрібному напрямку.

Приклади реального або можливого застосування сплавів з ЕПФ на практиці можна продовжити. Безсумнівно, в майбутньому такі матеріали знайдуть нові царини використання.

2. Методика вимірювань модулів пружності

Одним з достатньо інформативних методів вивчення механічних властивостей твердих тіл є дослідження температурних залежностей модуля Юнга та внутрішнього тертя. Подібні дослідження проводять зокрема при вивченні внутрішньої структури металів та її змінні в залежності від умов експериментів, наприклад, за наявності фазових переходів.

Відомо, що з підвищенням температури від ≈ 10 К до $\approx 0.5 \pm 0.6 T_{\text{плавл.}}$ у добре відпалених досконалих монокристалах, де відбуваються при нагріві (охолодженні) фазові перетворення, внутрішнє тертя монотонно зростає, а модуль Юнга зменшується. В тих випадках, коли в досліджуваному інтервалі температур можливі фазові або алотропічні перетворення, на монотонний температурний хід накладаються особливості. В полікрystalах вони можуть бути пов'язані з в'язким ковзанням зерен і релаксацією напружень, які залишаються після термообробки або виникають в процесі термоцикування, а також з низкою різних фізичних механізмів, зокрема і мартенситним перетворенням [14, 15].

2.1. Статичні методи

При розв'язанні проблем фізичного матеріалознавства в царині пружності, пластичності та міцності широко використовуються квазістатичні методи, в яких деформація зразків вивчається під дією повільно змінного навантаження, що спричиняє зсув чи кручення [16]. Для реалізації цього методу сконструйовано велику кількість випробувальних машин, серед яких слід відзначити машини типу «Instron». Прикладаючи навантаження для розтягування і вимірюючи подовження, знаходять модуль пружності при одноосному розтягуванні за формулою $E = \sigma/\varepsilon$, а модуль зсуву може бути визначений за формулою $G = t/g$ при випробуванні на кручення (σ і t – напруга, ε і g – відносні деформації розтягування та зсуву).

Відомі численні модифікації промислових випробувальних машин, спрямовані на підвищення жорсткості машин, розширення температурного діапазону вимірювань та автоматизації досліджень, які детально розглянуті в [17, 18].

Недолік статичних методів полягає в тому, що для отримання достатньо точних результатів необхідно досягати максимально можливих у межах пружності деформацій, при яких виникає небезпека виходу з області суто пружної поведінки матеріалу. Цей недолік часто проявляється при дослідженні матеріалів з низькою межею пружності, а також при високотемпературних дослідженнях.

2.2. Динамічні методи

Динамічні методи визначення модулів пружності дозволяють проводити вимірювання при малих деформаціях і відрізняються від статистичних більш високою чутливістю. Можливість застосування динамічних методів для вимірювання модулів визначається високою швидкістю розповсюдження пружної деформації в металах та сплавах. Швидкість пружної хвилі (швидкість звуку) в металевих матеріалах перевищує 1000 м/с, тобто навіть при великій швидкості навантаження в процесі вимірювань пружна деформація встигає відбутися повністю. Для динамічного визначення модулів розроблено декілька способів.

На дуже низьких частотах $10^{-1} \div 10^1$ Гц зазвичай дослідження проводять за допомогою різного типу крутильних маятників [19]. В цьому методі зразок закріплюють верхнім кінцем, а до нижнього приєднують підвіс з пристроєм для скручування. Іноді для зручності вимірювань використовують так званий перевернутий маятник, в якому жорстко закріплений нижній кінець зразка, а система скручування пов'язана з верхнім кінцем. В цьому випадку осьове навантаження на зразок від вантажу системи скручування сприймається спеціальною тонкою ниткою – підвісом. Закручуючи ричав перед початком вимірювань на визначений кут, можна

викликати крутильні коливання зразку, частота яких реєструється за допомогою оптичної системи.

Модуль зсуву матеріалу, з якого виготовлений зразок, визначається за формулою:

$$G = (128 \pi L I / d^4) f^2, \quad (2.1)$$

де L – довжина зразка, d – діаметр зразка, I – момент інерції системи скручування, f – частота коливань.

Момент інерції може бути визначений, якщо відомі маси вантажів, які переміщуються, і періоди коливань системи, що відповідають двом різним відстаням від вантажу до центру зразка. При такому способі вимірювань розміри зразку і параметри системи скручування підбирають зазвичай в такий спосіб, щоби частота коливань складала біля 1 Гц.

В діапазоні частот 1 – 10 Гц модулі пружності при одноосному розтягненні (або так званий модуль нормальної пружності) визначають при вимірюванні власної частот вільних коливань вигину зразку. Один кінець зразка затискається нерухомим захватом, а інший вільно коливається, перекриваючи пучок світла, що рухається від джерела світла до фотоелемента. Таким чином вимірюється частота вільних коливань вигину зразків [17, 18].

Методом, який широко застосовується, є використання різного роду п'єзоперетворювачів електричних коливань в механічні коливання різної поляризації в діапазоні частот від 10^5 до 10^8 Гц [19 – 21]. Досліджуючи в ехо-імпульсному режимі час розповсюдження акустичної хвилі зразку та її згасання, можна визначити зміни модулів пружності та внутрішнє тертя в зразку в залежності від зовнішніх умов. Використання фазочутливих методів реєстрації дозволяє проводити аналогічні дослідження шляхом збудження в зразках стоячих хвиль з частотою, кратною до частот власних механічних коливань зразків (акустичні резонатори).

Необхідно відзначити, що електронна апаратура, що забезпечує реалізацію цих методів, досить складна.

Швидкість розповсюдження пружних хвиль пов'язана з модулями пружності:

для повздовжньої хвилі:

$$v_c = \frac{E(1-\nu)}{\sqrt{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.2),$$

для зсувної хвилі:

$$v_t = \frac{G}{\sqrt{\rho}} \quad (2.3),$$

де ρ – густина матеріалу, ν – коефіцієнт Пуассона.

Описані динамічні методи дають відносну похибку визначення модулів пружності не більше 1%. Оскільки значення сталих пружності не залежать від швидкості прикладання навантаження, їх величини, що визначаються за динамічними методами, можуть бути використані у розрахунках для статичного навантаження.

3. Лабораторний стенд і методичні вказівки до проведення лабораторної роботи

3.1 Установка для вимірювання модуля Юнга

Наведений нижче матеріал містить деякі відомості попередньо розглянуті у літературному огляді. Але цей матеріал складає опис і методичні вказівки для виконання лабораторної роботи і наведений у якості макету для подальшого видання цих вказівок окремим друком.

Зростання промислового виробництва викликає не тільки збільшення потреби в матеріалах, а й підвищення вимог до їх властивостей в зв'язку з використанням машин і механізмів з кращими параметрами, підвищенням їх надійності, особливо в зв'язку з автоматизацією виробництва.

Вибір матеріалу для будь-якої певної мети роблять на основі його механічних, технологічних, фізичних і хімічних властивостей. Виявленням зв'язку цих властивостей зі структурою матеріалу і цілеспрямованою зміною властивостей в результаті впливу на структуру займається матеріалознавство, як загальна наука про властивості матеріалів. Практичне використання отриманих результатів є завданням технічного матеріалознавства.

Однією з областей технічного матеріалознавства є випробування матеріалів, найважливіша мета якого полягає в описі їх властивостей за характерними ознаками і в вираженні цих ознак в кількісній формі. Необхідно також регулярно контролювати зміни властивостей, що відбуваються в процесі виготовлення виробів (виробничий контроль). Крім цього, при контролі виробів, машин, конструкцій в ході їх експлуатації необхідно виявляти неприпустимі зміни властивостей матеріалу, а в разі пошкодження – визначати його причину.

При розробці матеріалів, їх виготовленні, обробці і застосуванні вони повинні піддаватися різноманітним випробуванням. З усього розмаїття властивостей матеріалів основними є механічні властивості, тому випробуванню механічних властивостей приділяється особлива увага.

Механічні властивості матеріалів є визначальними для надійності і довговічності в процесі експлуатації елементів конструкцій, деталей машин і приладів, виготовлених з цих матеріалів. Механічні властивості в числовому вигляді характеризують поведінку матеріалів під дією зовнішніх навантажень, що дозволяє порівнювати їх між собою і раціонально відбирати матеріали для виготовлення різних виробів.

Перед обговоренням методів дослідження механічних властивостей матеріалів нагадаємо деякі характеристики цих властивостей.

Деформація - зміни розмірів і форми тіла, що виникають в результаті дії на нього зовнішніх навантажень. Деформація, яка зникає після припинення дії навантаження, називається **пружною деформацією**. Після неї тіло повністю відновлює початкову форму і розміри. Деформація, що залишається після зняття навантаження, називається **залишкова (або пластична) деформація**.

Здатність матеріалу чинити опір деформації залежить від сили зчеплення його атомів і молекул. Ця сила характеризується величиною механічної напруги, що виникають в кожній точці деформованого тіла.

Механічна напруга—це міра внутрішніх сил, що виникають між атомами і молекулами тіла, яке деформуються під впливом різних факторів. Механічна напруга в точці тіла визначається як відношення внутрішньої сили до одиниці площі в даній точці розглянутого перетину. Відтак, розмірність механічної напруги – МПа ($1 \text{ МПа} = 1 \text{ Н} / \text{мм}^2$, або $1 \text{ МПа} \approx 0.1 \text{ кгс} / \text{мм}^2$).

Механічна напруга є результатом взаємодії атомів і молекул тіла при його навантаженні. Зовнішні сили прагнуть змінити взаємне розташування атомів і молекул, а виникаючі при цьому напруги перешкоджають зсуву цих частинок.

Повна механічна напруга тіла для зручності розрахунків розкладається на дві взаємно перпендикулярні складові: **нормальну напругу (σ)** та **дотичну напругу (τ)**. Нормальні напруги діють по нормалі до площини перетину тіла, тобто між частками, які належать площині перетину і

найближчими паралельними до неї прошарками атомів. Вони характеризують прагнення частинок матеріалу зблизитися або віддалитися одна від іншої. Дотичні напруги діють між частками матеріалу, які належать площині перетину і характеризують прагнення частинок змінювати відстань між ними та ковзати відносно частинок, які належать прошаркам паралельним до площини перетину. Чисельні значення σ і τ залежать від вибору згадуваного перетину.

До основних механічних властивостей матеріалів відносяться:

міцність – здатність матеріалу чинити опір пластичним деформаціям і руйнуванню;

жорсткість – здатність матеріалу чинити опір розвитку значних пружних деформацій;

пружність – здатність матеріалу відновлювати свою форму і розміри після припинення дії значних зовнішніх навантажень, що викликали деформацію;

пластичність – здатність матеріалу під дією зовнішніх навантажень змінювати, не руйнуючись, свою форму і розміри і зберігати залишкові деформації після усунення цих навантажень;

твердість – здатність поверхневого шару матеріалу чинити опір локальній пластичній деформації, яка виникає під час занурення в нього іншого більш твердого тіла;

ударна в'язкість – здатність матеріалу чинити опір дії ударних навантажень.

Перша вимога, що пред'являється до більшості виробів – це достатня міцність. Багато виробів, крім загальної міцності, повинні володіти ще особливими властивостями в залежності від їх призначення і умов експлуатації. Наприклад, ріжучі інструменти повинні володіти високою твердістю, для виготовлення ресор і пружин застосовують спеціальні сталі і сплави, що володіють високою пружністю. В'язкі матеріали йдуть на виготовлення деталей, які при роботі зазнають ударного навантаження, пластичні матеріали добре обробляються тиском.

Механічні властивості визначаються за результатами механічних випробувань стандартних зразків матеріалів. За видом деформації зразка, розрізняють випробування на розтяг, стиск, вигин, зсув, кручення. Кожне з цих випробувань відрізняється схемою навантаження зразка, переважаючим напрямом напруг, які виникають в зразку, і типом руйнування зразка. Ці відмінності відображені в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Вид навантаження	Схема навантаження	Напрямок дії напруження		Тип руйнації	
		σ	τ	крихка	в'язка
Розтягування					
Стиснення					
Вигин					
Зсув					
Кручення					

Механічні випробування розрізняють за характером зміни навантаження з часом: статичні, динамічні (або ударні) і втомні.

Статичними називаються випробування, при яких зразок досліджуваного матеріалу піддають дії постійного або, найчастіше, повільно і плавно збільшуваного навантаження. Найбільш важливі наступні види статичних випробувань:

- випробування на розтягнення. Під час випробування на розтягнення безперервно і плавно підвищується навантаження. Це основний вид механічних випробувань, якому піддають металеві матеріали при температурах вище 300° С, а також полімери;
- випробування на стиснення. Цьому випробуванню піддають будівельні матеріали (дерево, камінь, цегла, бетон), а також металеві і полімерні матеріали спеціального призначення (наприклад, матеріали для підшипників);
- випробування на вигін. Галузь застосування цих випробувань – полімери, будівельні матеріали, дерево, скло, кераміка, тендітні металеві матеріали;
- випробування на зрушення. На зрушення випробовуються такі матеріали, як дерево, метали для клепок, матеріали для ріжучого інструменту;
- випробування на скручування. Випробуванням на скручування піддають матеріали для виготовлення дроту, а також малопластичні матеріали (загартовані конструкційні та інструментальні сталі).

За результатами статичних випробувань визначають міцність, пружні і пластичні властивості матеріалів.

Динамічні випробування характеризуються докладанням до зразка навантажень з різкою зміною їх величини і великою швидкістю деформації. Тривалість всього випробування не перевищує часток секунди. До цих випробувань відносяться удар, і навіть вибух. За результатами динамічних випробувань в основному визначають величину роботи, яка витрачена на деформацію або руйнування зразка. Даних про величину напруг і деформацій в процесі цих випробувань зазвичай не отримують.

Випробування на ударний розтяг використовують для визначення міцності та пластичності матеріалу при його розтягуванні з високою

швидкістю. Випробування на ударні стиснення застосовується вкрай рідко. Випробування на ударне кручення застосовують для визначення в'язкості матеріалів, що мають дуже низьку в'язкість (цинкові сплави, литі матеріали, інструментальні сплави, порошкові матеріали, полімерні матеріали).

Випробування на ударний вигин (ударну в'язкість) має найбільше значення для визначення опору крихкому руйнуванню в'язких металевих і високо полімерних матеріалів. Це випробування є найпоширенішим (після розтягування) випробуванням матеріалів у багатьох виробництвах.

Випробування на втомленість проводяться багаторазовою циклічною зміною навантаження зразка. Такі випробування зазвичай тривають годинами і сотнями годин. За їх результатами визначають число циклів навантаження до руйнування зразка при різних значеннях максимальної напруги. В кінцевому підсумку визначають межу витривалості матеріалу – граничні напруги, які зразок витримує без руйнування протягом заданого числа циклів навантаження. Випробування на втому проводяться на розтяг, стиск, вигин, крутіння. Їм піддаються всі матеріали.

Крім перерахованих розрізняють ще дві групи випробувань. Перша група – випробування на твердість.

Друга група – випробування на повзучість і тривалу міцність. Їх зазвичай проводять при підвищених температурах для оцінки характеристик жароміцності матеріалів. Зразки протягом всього випробування перебувають під постійним навантаженням. При випробуваннях на повзучість вимірюють величину деформації в залежності від часу випробування. При випробуваннях на тривалу міцність оцінюють час до руйнування зразка під дією певної напруги.

Механічні випробування можна проводити при високих і низьких температурах, при наявності надрізів і вихідних тріщин, опроміненні, з використанням нестационарних режимів, в агресивних середовищах і в різних інших умовах. Особливість дослідження механічних властивостей при низьких температурах визначає мале значення межі пружності. Тому в

області низьких температур пружні властивості тіл слід визначати при невеликих механічних напругах і короткочасних силових впливах. Найбільш придатними в цьому випадку виявляються динамічні акустичні методи вивчення властивостей матеріалів, засновані на збудженні в середовищі різних видів механічних коливань і вимірі швидкості їх поширення, загасання, резонансних частот і т. п., за якими можуть бути розраховані модулі пружності та інші характеристики матеріалів.

Теоретичною основою цього методу досліджень механічних властивостей є отримані числовими методами рішення рівнянь теорії пружності для поперечних хвиль в стрижні круглого або прямокутного перетину. Така хвиля для стрижня є поширенням вздовж нього його вигину. Відповідні цій хвилі коливання називають коливаннями вигину. У випадку розташування підвісів збуджувача та приймача коливань на краях стрижня маємо:

$$\omega_{min} = \frac{9,87}{l^2} \sqrt{\frac{EI_y}{\rho S}}, \quad (3.1)$$

де ω_{min} найменша з частот (основна гармоніка), ρ – щільність матеріалу, I_y – момент інерції одиниці довжини зразка відносно осі, яка проходить через центр ваги зразка перпендикулярно його поперечному перетину, S – площа поперечного перетину зразка [19].

Підставивши в (3.1) значення моменту інерції круглого або прямокутного зразка, геометрія якого задовольняє вимозі $l \gg d$, отримаємо основні рівняння для модуля Юнга стрижнів круглого перетину

$$E = 1,2864 \cdot 10^{-8} \frac{\rho l^4}{d^2} f_0^2, \quad (3.2)$$

і стрижнів прямокутного перетину

$$E = 0,9648 \cdot 10^{-8} \frac{\rho l^4}{d^2} f_0^2, \quad (3.3)$$

де d – діаметр зразка, b – розмір прямокутного зразка у напрямку підвіса, f_0 – найменша резонансна частота. Якщо в формулах (3.2) і (3.4) d , b і l виражені у см, частота у s^{-1} (герцах), щільність у $г/см^3$, тоді модуль пружності буде мати розмірність $кгс/мм^2$ в технічній системі ($1 кгс/мм^2 = 9,807 \cdot 10^6 Па$).

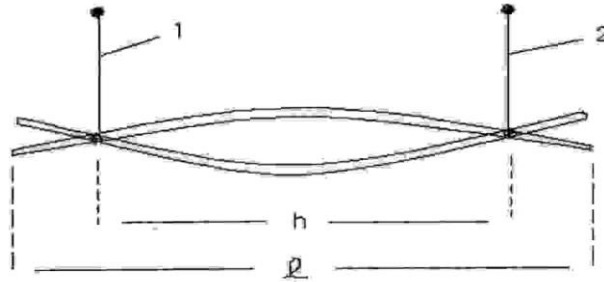


Рисунок 3.1. Схема поперечних коливань на основній частоті ω_{\min} стрижня, закріпленого на підвісах 1 і 2

Для отримання коливань найбільш досконалої форми необхідно, щоб точки підвісу були розташовані біля вузлів коливань вигину (дивись Рис. 3.1). Відстань між вузлами h визначається довжиною зразка і на основній (самій низькій) частоті власних коливань зразка складає $0,55 \cdot l$. Для підвищення точності визначення E необхідно враховувати термічне розширення зразків.

Іншою важливою величиною, яка визначає втрати енергії при механічних коливаннях, є внутрішнє тертя Q^{-1} , обумовлене дифузійними процесами у матеріалах. Зазвичай згасання коливань характеризують декрементом згасання $\gamma = 1/\tau$, де τ – проміжок часу, за який амплітуда зменшується у $e \approx 2,7$ рази. Для того, щоб визначення величини згасання акустичних коливань не залежало від періоду користуються логарифмічним декрементом згасання $\theta = \ln(A_n / A_{n+1})$, де A_n і A_{n+1} дві послідовні амплітуди через проміжок часу, що дорівнює періоду T . Якщо за N періодів амплітуда зменшиться у e разів, тобто $N\theta = 1$ можна казати, що $\theta = 1/N$. В нашому випадку ми маємо справу з вимушеними коливаннями, під дією гармонічної сили $F = F_0 \cos \omega t$, які збуджуються у металевих зразках з достатньо малим

декрементом згасання (ω – частота зовнішньої сили). У цьому випадку диференціальне рівняння приводить до наступного рішення [3]

$$A = A_0 \exp(i\varphi); \quad (3.4a)$$

$$A_0 = \frac{F}{m} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2 \omega^2}}; \quad (3.4б)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{2\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = \frac{2\gamma\omega}{\omega^2 - \omega_0^2}. \quad (3.4в)$$

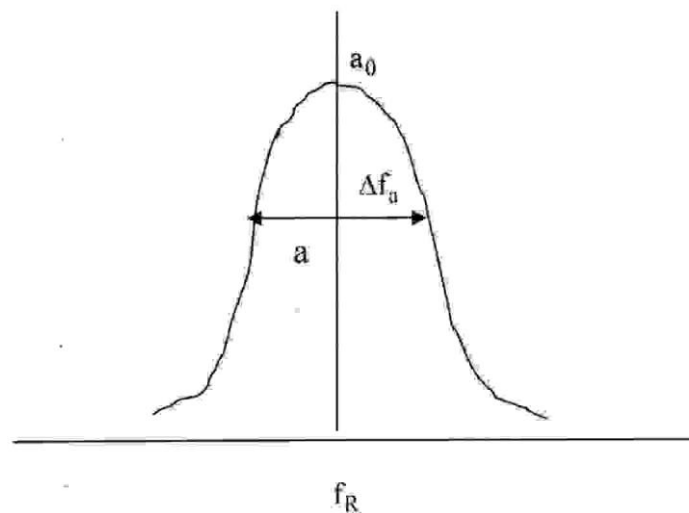


Рисунок 3.2. Амплітудно-частотна характеристика поблизу ω_0 .

Рівняння 3.4б описує амплітудно-частотну характеристику системи (рис. 3.2) і її можливо отримати шляхом експериментальних випробувань.

Важливою характеристикою осцилятора є зростання амплітуди його коливань при резонансі. Це зростання зветься **добротністю** Q .

$$Q = \frac{A_{0\text{рез}}}{A_{0\text{стат}}} = \frac{\omega_0}{2\gamma} = \frac{2\pi}{2\gamma T} = \frac{\pi}{\Theta}, \quad (3.5)$$

де $A_{0\text{рез}}$ – динамічний вигін, $A_{0\text{стат}}$ – вигін при статичному навантаженні.

Варто пам'ятати, що згасання коливань пов'язані з енергетичними втратами. Тому ширина резонансної кривої визначається відносно квадрата амплітуди, так як енергія $W \sim A^2$. З рівняння 3.4б за умови $\omega \approx \omega_0$ отримуємо

$$A_0^2 \approx \left(\frac{F_0}{m} \right) \frac{1}{\omega_0^2 (\Delta\omega)^2 + 4\gamma^2 \omega_0^2}. \quad (3.6)$$

При резонансі добротність визначається шириною резонансної кривої на рівні $0,5 \cdot A_{0рез}^2$. Умова зменшення амплітуди у 2 рази має вигляд

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4\gamma^2 \omega_0^2} = \frac{1}{\omega_0^2 (\Delta\omega)^2 + 4\gamma^2 \omega_0^2}. \quad (3.7)$$

Тобто $\Delta\omega = 2\gamma$ або $Q = \omega_0 / \Delta\omega$. Обернена величина $Q^{-1} = \Delta\omega / \omega_0$ характеризує внутрішнє тертя. Якщо резонанс яскраво виражений, тобто $Q \gg 1$, експериментально визначити $\Delta\omega$ дуже важко. Тому скористаємось наступним. Оскільки $Q^{-1} \sim \gamma \sim A_0^{-1}$, поведінку Q^{-1} у відносних одиницях можливо спостерігати у вигляді залежності оберненої амплітуди при резонансі $A_{0рез}^{-1}$ від температури.

Як відомо, внутрішнє тертя призводить і до зміни динамічного модуля пружності (дефект модуля). Цей ефект також може бути використаний для визначення величини внутрішнього тертя. Але у випадках, коли декремент згасання малий цей ефект дуже незначний.

Очевидно, що всі ці випробування матеріалів потребують для свого здійснення різноманітного експериментального обладнання. За довгий час свого широкого використання таке обладнання набуло багатьох форм, з якими можна ознайомитись в чисельних публікаціях (див., наприклад, ¹).

Схематичне зображення установки для проведення лабораторної роботи – еластоміру наведено на рис. 3.3. На установці можуть бути досліджені зразки довжиною 140 мм. Обов'язковою вимогою до розмірів зразка, який буде досліджуватись на цій установці є $l \gg d$, де l – довжина, а d – найбільший з розмірів поперечного перетину зразка. Якщо виготовлення зразків потребує механічної обробки, то зразки перед дослідженням відпалюють протягом 1 – 2 годин за температури $T \approx 0,8 \cdot T_{пл}$ з наступним охолодження до кімнатної температури протягом трьох годин. $T_{пл}$ – температура плавлення матеріалу зразка.

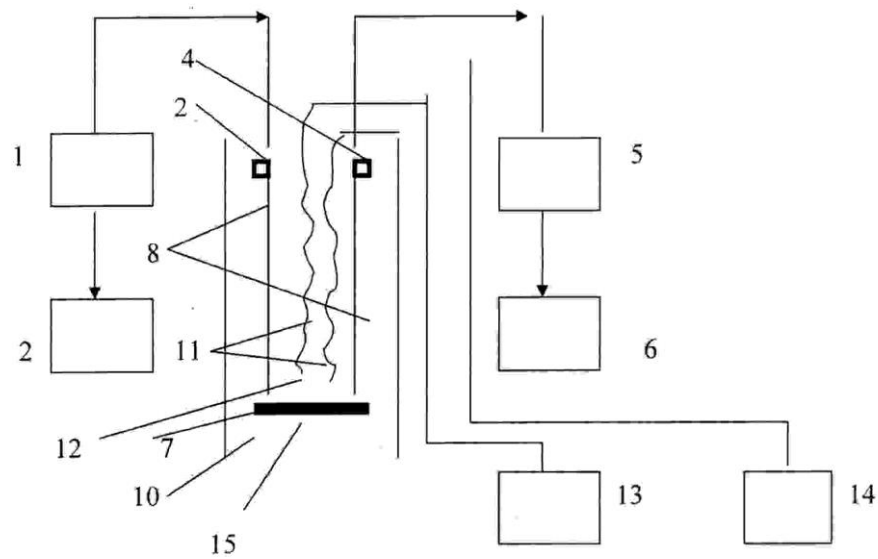


Рисунок 3.3. Схема установки для виконання експериментальних досліджень механічних властивостей динамічним резонансним методом: 1 – генератор, 2 – випромінювач, 3 – частотомір; 4 – приймач; 5 – підсилювач; 6 – осцилограф; 7 – зразок; 8 – підвіси; 9 – термостатична камера; 10 – кріостат; 11 – термопари; 12 – допоміжний зразок; 13 і 14 – мілівольтметри; 15 – нагрівач.

Варто пам'ятати, що характерний час релаксаційних процесів, які впливають на поведінку модулів пружності (E) і внутрішнього тертя (Q^{-1}) зразка, накладає певні обмеження на значення E і Q^{-1} . Значення E , отримане обговорюваним методом, називають динамічним і позначають так: E_{ω} . Воно дуже близьке до значення E , отриманого статичними методами.

До джерела електричних коливань – генератора ГЗ-18 (1) підключений електродинамічний перетворювач – збуджував акустичних коливань (2). Частота генератора контролюється частотоміром ЧЗ-34 (3) з точністю 0,1 Гц. З прийомного перетворювача (4) сигнал за допомогою підсилювача В2-6 (5) подається для контролю на осцилограф (6), за допомогою якого спостерігається резонанс. Зразки на підвісах розташовані усередині термостатуючої мідної масивної камери. Один зразок робочий, а інший – контрольний, за допомогою якого контролюється температура. На контрольному зразку розташована мідь-константанова термопара, яка з

урахуванням конструкції камери забезпечує точність вимірів температури $\sim 1\text{K}$.

На рисунку 3.4 наведений приклад результатів, які можуть бути отримані у ході виконання запропонованої лабораторної роботи на зразках, в яких спостерігається ефект пам'яті форми.

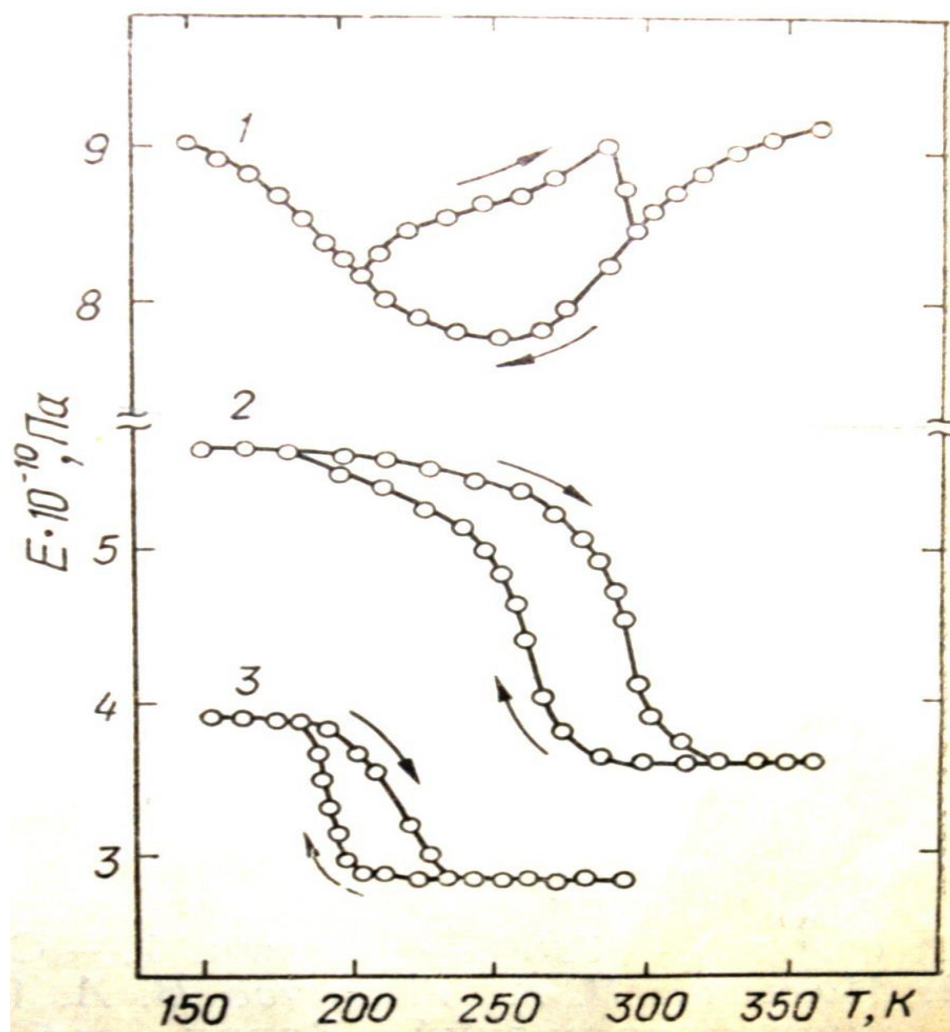


Рисунок 3.4. Температурні залежності модуля Юнга у сплавах з пам'яттю форми : 1 – полікристалічний $\text{Ni} + 49,5\% \text{ ат. Ti}$; 2 і 3 – монокристалічні $\text{Cu} + 13,76\% \text{ Al} + 3\% \text{ мас. Ni}$ і $\text{Cu} + 14,5\% \text{ Al} + 5\% \text{ мас. Ni}$ відповідно.

3.2. Завдання до лабораторної роботи

1. Змонтувати рекомендовані викладачем зразки матеріалів системи Cu – Al – (Fe, Ni, Co, Mn) на підвіси в низькотемпературній камері для проведення досліджень.

2. Підготувати низькотемпературну камеру.

3. Шляхом обдуву низькотемпературної камери газуватим азотом поступово знизити температуру в камері зі швидкістю приблизно 1К/хвил.

4. Отримати температурні залежності резонансної частоти і амплітуди коливань в інтервалі 300 – 80 К. Крок вимірювань приблизно 5К.

Форма і амплітуда коливань контролюється за допомогою осцилографа, частота, яка відповідає резонансу, фіксується частотоміром.

Температура одночасно контролюється за допомогою термопари, яка розташована на допоміжному зразку, який розташований поруч з робочим.

Рекомендується перед початком вимірювань занести у таблицю величину термоелектрорушійної сили термопари, яка відповідає обраним для подальшого вимірювання температурам.

5. Провести аналогічні вимірювання у процесі нагріву зразка від азотної до кімнатної температури.

6. Дані вимірювань занести до таблиці.

7. На основі отриманих залежностей резонансної частоти побудувати температурні залежності пружних модулів зразків.

8. Оцінити у відносних одиницях температурні залежності внутрішнього тертя.

8. Проаналізувати отримані дані, прослідковуючи поведінку модулів пружності в області температур фазового переходу (немонотонна стрибкоподібна температурна залежність).

Висновки

1. Температурні залежності модулів пружності та внутрішнього тертя матеріалів є потужним інформативним способом отримання даних про механічні властивості твердих тіл. Їх доцільно запропонувати в якості теми лабораторної роботи, яка пропонується для спецпрактикуму з фізики низьких температур для 4 курсу.
2. Об'єктом лабораторної роботи є температурні залежності модулів пружності та внутрішнього тертя низьки конструкційних матеріалів, в яких спостерігаються оборотні мартенситні перетворення, що призводять до відтворення вихідних геометричних параметрів зразків – явища ефекту пам'яті форми.
3. Пропонована лабораторна робота дозволяє закріпити теоретичні знання з теорії пружності, закріпити набуті під час проходження загальнофізичних лабораторних практикумів та спецпрактикумів навички роботи з вимірювальною технікою, кріогенною технікою, а також визначення температури в процесі досліджень акустичними методами.
4. Пропонована лабораторна робота дозволяє ознайомитись з функціональними властивостями матеріалів з ефектом пам'яті форми, дослідити термомеханічні властивості таких матеріалів, набути нові експериментальні навички роботи з акустичним та кріогенним обладнанням.

Список використаної літератури

1. Чолпан П. П. Фізика. – Київ: Вища школа, 2003. – 567 с.
2. В.С. Кшнякин, А.С. Опанасюк, К.О. Дядюра. Основи фізичного матеріалознавства: навчальний посібник. – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 460 с.
3. Ю. М. Поплавко . Фізика твердого тіла : підручник. В 2-х томах. Київ : Політехніка (КПІ ім. Ігоря Сікорського), 2017. – Том 1: Структура, квазічастинки, метали, магнетики. – 415 с.
4. Tadaki T. Shape memory materials / T. Tadaki, K. Otsuka, C. M. Wayman // Cambridge University Press. – 1998. – P. 97 – 116.
5. Ю. М. Коваль. Сплави з ефектом пам'яті форми – потужний клас функціональних матеріалів // Наука та інновації. – 2005. – Т 1.№ 2. – С. 80–95.
6. Куцова В.З. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями / В.З.Куцова, М.А. Ковзель, О.А. Носко – Дніпропетровськ: НМетАУ. –2008. – 350 с.
7. W. J.; Pickart, S. J. (1965). Crystal Structure and a Unique Martensitic Transition of TiNi // Journal of Applied Physics.– 1965. – V. 10. – P. 3232-3239.
8. Сучасне матеріалознавство ХХІ століття / Відп. ред. І. К. Походня. – Київ : Наукова думка, 1998. 657 с.
9. Матеріалознавство та технологія матеріалів. Конспект лекцій / уклад. Т.М. Курська, Г.О. Чернобай, С.Б. Єрмоєнко. – Харків: УЦЗУ, 2008. – 136 с.
10. H. Fu, S. Song, L. Zhuo et al. Enhanced mechanical properties of polycrystalline Cu-Al-Ni alloy through grain boundary orientation and composition control // Mater. Sci. Eng. A. – 2016. – V.650. – P. 218 – 224.
11. Матеріалознавство: Підручник/ Є.Г.Афтанділянц, О.В.Зазимко, К.Г.Лопатько. – К: М-во освіти і науки України, 2012. – 549 с.

12. Duerig T.W. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys / T.W. Duerig, K.N. Melton, D. Stökel, C.M Wayman // London : Butterworth-Heinemann. – 1990. – P. 512.
13. Пахолюк А. П. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали: посібник / А. П. Пахолюк, О. А. Пахолюк. — Львів: Світ, 2005. — 172 с.
14. Прикладне матеріалознавство: підручник / В.І. Большаков, О. Ю. Береза, В. І. Харченко; під ред. В.І. Большаков. – 2-е вид.– Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-VAL», 2000.– 290 с.
15. Інженерне матеріалознавство: підручник для студентів ВНЗів / О.М. Дубовий, Ю.О. Казимиренко, Н.Ю. Лебедева, С.М. Самохін; Нац. ун-т кораблебудув. ім. адмірала Макарова. – Миколаїв: НУК, 2009. – 444 с.
16. Теорія пружності. Частина 1 [Електронний ресурс] : підручник / А. Є. Бабенко, М. І. Бобир, С. Л. Бойко [та ін.]. – Електронні текстові данні (1 файл: 1,27 Мбайт). – Київ: Основа, 2009. – 244 с.
17. В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. Теорія технічних систем. – К.: ЦП „КОМПРИНТ”, 2017. – 291 с.
18. Горбатюк Є. О., Мазур М. П., Зенкін А. С., Каразей В. Д. Технологія машинобудування. – Львів: Новий світ – 2000, 2012. – 358 с.
19. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Нові матеріали» для студентів спеціальності «Динаміка і міцність машин» – Частина 3 «Динамічні властивості конструкційних пластмас та композиційних матеріалів». Для студентів напрямку підготовки 6.050501 "Прикладна механіка" // Шидловський М.С., Бабенко А.Є., Боронко О.О., Трубачев С.І. – К.: НТУУ "КПІ", 2016. – 41 с.
20. Безимянний Ю.Г., Козирацький Є.О., Назаренко В.А., Талько О.В. Оцінка модуля пружності порошкових пресовок за результатами акустичних вимірювань. Матеріали VI міжнар. конф. HighMatTech. – Київ, 2019. – с. 209.
21. Безвесільна. О. М. Перетворювачі фізичних величин. Технічні засоби автоматизації / підручник. – К.: НПО «Пріоритети», 2019 – 809 с.