

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА: «ВИВЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМІЧНО СТИМУЛЬОВАНИХ КОЛИВАНЬ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ.»

**Рокицький М.О.,**

*кандидат фіз.-мат. наук, доцент,*

*Національний педагогічний університет імені М.П. Драгоманова*

**Шут А.М.,**

*кандидат фіз.-мат. наук, доцент,*

*Київський національний університет технологій та дизайну*

**Рокицька Г.В.,**

*аспірант,*

*Національний педагогічний університет імені М.П. Драгоманова*

Пропонується лабораторна робота спеціального фізичного практикуму для студентів фізичних та технічних спеціальностей. Обґрунтовується необхідність та доцільність впровадження новітніх досягнень у галузі фізики нанокompозитів в навчальний процес.

Предлагается лабораторная работа специального физического практикума для студентов физических и технических специальностей. Обосновывается необходимость и целесообразность внедрения новейших достижений в области физики нанокompозитов в учебный процесс.

Invited to a special lab physics laboratory for students of physics and engineering majors. The necessity and appropriateness of implementation of the latest achievements in physics of nanocomposites field in the teaching and educational process is substantiated.

Розвиток науки і техніки, зокрема, космічної, потребує неперервного вдосконалення та мініатюризації обладнання. У зв'язку з цим, виникає потреба у вивченні та використанні нових конструкційних матеріалів із новими властивостями. Яскравими представниками таких матеріалів, які інтенсивно досліджуються та набули широкого поширення, є тверді електроліти – суперіонні провідники (суперіоніки) [1, 2]. Серед твердих електролітів особливу увагу привертає йодид срібла – AgI, який окрім фазового переходу типу діелектрик – суперіонік, характеризується аномальною дилатометричною поведінкою, що призводить до стрибкоподібної зміни його об'єму.

При значному комплексі позитивних характеристик, притаманних твердим електролітам, їх експлуатаційні характеристики у більшості випадків не дозволяють використовувати тверді електроліти у складних зовнішніх умовах і агресивних середовищах. Тому актуальною є розробка нових матеріалів, які були б стійкими до дії зовнішнього середовища та не втрачали б властивості суперіонної провідності.

Такими матеріалами можуть бути полімерні композиції на основі хімічно стійких полімерів, у яких в якості дисперсного наповнювача використовуються тверді електроліти, а саме AgI.

В якості полімерної матриці пропонується використання полімерів, які здатні до кристалізації. Яскравими представниками таких полімерів є високомолекулярний поліефір – пентапласт та поліхлортрифторетилен (ПХТФЕ). Такі полімерні композиції вирізняються наявністю в досліджуваному температурному інтервалі двох фазових нестабільностей – плавлення та склування аморфної складової полімерної матриці, що дозволяє отримати більш повну та глибоку інформацію про взаємовплив компонентів подібних систем.

За певних умов у таких системах спостерігається явище термічно стимульованих коливань лінійних розмірів [3 - 5]. Полімерні композиції, в яких збуджуються термічно стимульовані коливання лінійних розмірів, можуть бути зокрема використані в електричних схемах управління в якості термосигналізаторів. Існує також можливість їх використання в якості матриці прес-форм для термобаричного формування виробів з термопластичних та термореактивних полімерних композиційних матеріалів. Відкрите явище є підтвердженням вагомому внеску в формування структури і властивостей композиції складової взаємодії компонентів на межі розділу, що зумовлена різницею їх температурних коефіцієнтів лінійного розширення (ТКЛР).

**Метою** є розробка лабораторної роботи спеціального фізичного практикуму для студентів фізичних та технічних спеціальностей на основі досліджень особливостей ТКЛР композиційних систем на основі поліхлортрифторетилен (ПХТФЕ) – AgI та пентапласт – AgI.

Лабораторна робота передбачає: ознайомлення студентів із загальними закономірностями процесу теплового розширення твердих тіл і полімерів, полімерних композицій, що містять наповнювачі з аномальною дилатометричною поведінкою; вивчення будови та принципу дії вимірювального пристрою і основної його частини – дилатометра; дослідження температурної залежності ТКЛР систем поліхлортрифторетилен – AgI та пентапласт – AgI до температури фазового переходу AgI та в температурному інтервалі фазового переходу; виявлення явища та дослідження параметрів термічно стимульованих коливань лінійних розмірів в околі температури фазового переходу AgI; аналіз джерел та значень похибок вимірювань.

*Завдання:*

1. Ознайомитись із загальними закономірностями твердих тіл та полімерів.
2. Ознайомитись із особливостями теплового розширення полімерних композицій, які містять наповнювачі з аномальною дилатометричною поведінкою.
3. Вивчити будову та принцип дії експериментальної установки лінійного дилатометра для визначення ТКЛР полімерних композиційних матеріалів.
4. Дослідити температурні залежності ТКЛР систем поліхлортрифторетилен – AgI та пентапласт – AgI.
5. Виявити явище та дослідити параметри термічно стимульованих коливань лінійних розмірів полімерних композицій в околі температури фазового переходу наповнювача.
6. Оцінити похибки вимірювань.

*Прилади і матеріали:*

1. Лінійний дилатометр;
2. Зразок для досліджень;

3. Набір еталонних пластин;
4. Мікрометр;
5. Лінійка.

*Теоретичні відомості*

В основу теорії лінійного розширення твердого тіла покладено модель нескінченного ідеального монокристала, атоми якого взаємодіють між собою силами електростатичного притягання та відштовхування.

Сили взаємодії між структурними частинками твердого тіла змінюються в залежності від змін відстаней між ними (рис. 1.) [6]

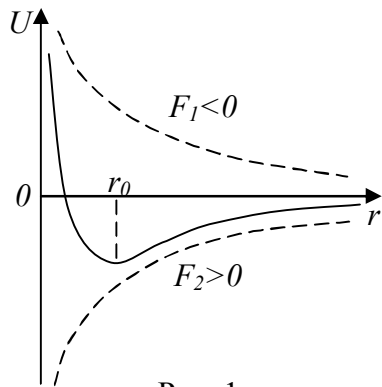


Рис. 1

Для ідеального кристала сили зв'язку описуються законом Гука:

$$F = -k \frac{\Delta x}{x_0}; \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт пружного зв'язку,  $x_0 = a$  – стала ґратки;  $\Delta x$  – зміщення частинки.

При низьких температурах енергія теплового руху атомів здебільшого значно менша від потенціальної енергії

взаємодії між ними.

Енергія коливальних теплових рухів визначає внутрішню енергію твердого тіла, яка, в свою чергу, визначає його температуру. Відомо, що при підвищенні температури відбувається теплове розширення твердих тіл – збільшення об'єму монокристалу обумовлене несиметричністю результуючого потенціалу взаємодії у кристалічній ґратці. Така несиметричність (ангармонізм) результуючої сили проявляється як взаємодія коливань фононного спектру.

Кількісно теплове розширення характеризують коефіцієнтами лінійного  $\alpha$  та об'ємного  $\beta$  розширення:

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \left( \frac{dl}{dT} \right)_p; \quad \beta = \frac{1}{V_0} \left( \frac{dV}{dT} \right)_p, \quad (2)$$

де  $l_0, V_0$  – початкові довжина та об'єм.

Для двоатомної моделі твердого тіла елементарне рівняння для ТКЛР  $\alpha$  матиме вигляд:

$$\alpha = \frac{kb}{r_0 a^2}, \quad (3)$$

де  $a$  – коефіцієнт квазіпружної сили,  $b$  – коефіцієнт ангармонічності  $r_0$  – рівноважна відстань між атомами, що відповідає мінімуму потенціальної енергії.

Загальновідомо, що знак коефіцієнта теплового розширення визначається знаком коефіцієнта ангармонічності. Найчастіше  $b$  – величина додатна і, відповідно, коефіцієнт теплового розширення також додатний, тобто при нагріванні тіла розширюються. Для деяких речовин  $b$  може набувати від'ємних значень. Серед таких речовин – кристали структурного типу алмазу, сфалериту, наприклад кальцій, телур, цинк, селен, вода.

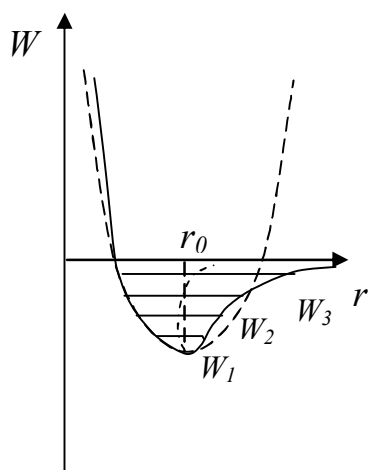


Рис. 2

Найбільш яскраво можливість існування від'ємних значень коефіцієнта розширення ілюструється на прикладі взаємодії двох атомів [7]. Можливий вигляд кривої потенціальної енергії двох атомів представлена на рис. 2.

При деякому значенні повної енергії (заштрихована площа) характер взаємодії атомів змінюється так, що коефіцієнт ангармонічності змінює знак на від'ємний. Це означає, що при зміні відстані між атомами сили притягання зростають швидше, ніж сили відштовхування. В результаті у температурній області, що відповідає цьому

значенню повної енергії, коефіцієнт теплового розширення стає від'ємним, тобто із збільшенням температури відстань між атомами зменшується.

Коефіцієнт  $\gamma$ , що характеризує зміну температури тіла при адіабатичній зміні об'єму тіла називається параметром Грюнайзена. Необхідно зауважити, що параметр Грюнайзена є важливим при побудові теорії твердого тіла. У випадку теплового розширення твердого тіла він є мірою ангармонічності діючих сил, які і є причиною теплового розширення [7].

Параметр Грюнайзена для одноатомного твердого тіла пов'язаний з температурним коефіцієнтом об'ємного розширення (ТКОР) та іншими термодинамічними величинами [8]:

$$\beta = \gamma \frac{c_V}{V} \chi_T. \quad (4)$$

З аналізу рівняння (4) цілком зрозумілим буде те, що знак  $\gamma$  буде визначати знак  $\beta$ . Слід розуміти, що  $\gamma$  є середньозваженим із  $\gamma_i$ , що відповідають частотам нормальних коливань фононного спектру. Середнє значення параметра Грюнайзена може стати від'ємним у тому випадку, якщо отримані від'ємні значення  $\gamma_i$  будуть давати основний внесок у величину  $\gamma$ . Ця умова виконується для області низьких температур, де основний внесок мають акустичні коливання.

Отже, поява від'ємних значень  $\alpha$  та  $\beta$  можлива в результаті особливостей фононного спектру в області низьких частот. Знак параметра Грюнайзена залежить від балансу  $\gamma_i$ , що відповідають різним частотам фононного спектру: дають як додатній, так і від'ємний внесок у  $\gamma$ .

В якості об'єктів дослідження пропонуються матрично-дисперсні системи поліхлортрифторетилен – AgI та пентапласт – AgI.

В якості полімерної матриці пропонується поліхлортрифторетилен (ПХТФЕ) [9] - типовий представник полімерів здатних до кристалізації, що має ряд унікальних властивостей: досить висока температура плавлення ( $T_{пл} \approx 482 \text{ K}$ ), висока механічна міцність, низька паро- і газопроникність, світлопрозорість, хімічна стійкість, тощо.

При кімнатній температурі поліхлортрифторетилен не розчиняється ні в одному з відомих органічних розчинів; фізико – механічні властивості і особливо діелектричні

властивості дуже чутливі до змін надмолекулярної структури. Хімічна формула ПХТФЕ представлена на рис. 3.

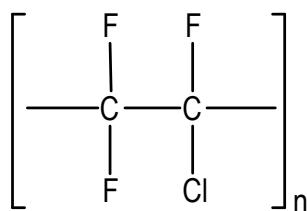


Рис. 3

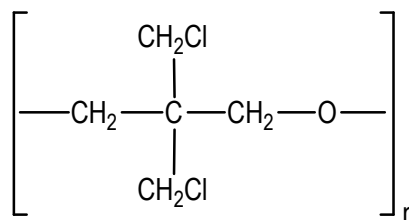


Рис. 4

Також в якості полімерної матриці пропонується високомолекулярний полієфір – пентапласт [10], який одержується полімеризацією мономера 3,3-біс(хлорметил)оксациклобутану. Хімічна формула пентапласта представлена на рис. 4.

Завдяки симетричному розташуванню у просторі хлорметильних груп вздовж основного ланцюга, пентапласт стійкий до дії розчинників, а також характеризується високою теплостійкістю. По хімічній стійкості пентапласт займає проміжне положення між фторопластом і полівінілхлоридом. У більшості випадків зміна показників механічних властивостей пентапласту в агресивних середовищах не перевищує  $\pm 5\%$ . Вироби з пентапласту не проявляють хладотекучості, не мають внутрішніх напруг і здатні зберігати задані розміри. Пентапласт характеризується малим коефіцієнтом лінійного розширення, високою стійкістю до стирання і низькою в'язкістю розплаву. Температура плавлення пентапласта становить  $T_{пл} \approx 453 \text{ K}$ .

В якості дисперсного наповнювача ми використовували йодид срібла марки "Ч". Йодид срібла - жовто-зелена кристалічна речовина, яка погано розчиняється у воді та помітно розчиняється у концентрованих розчинах йодидів лужних металів, особливо при нагріванні. Йодид срібла AgI є типовим представником суперіонних провідників (твердих електролітів).

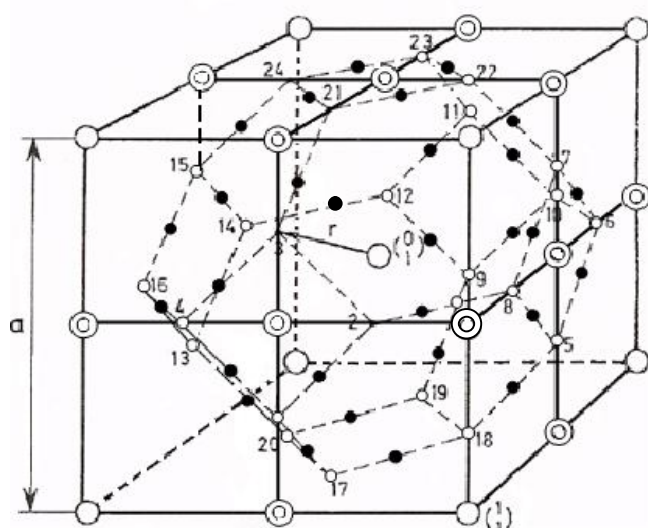


Рис. 5

Цей клас речовин має ряд унікальних властивостей: в більшості – це діелектрики, при нагріванні яких до температур, значно нижчих від температур плавлення, стрибкоподібно (на 2 – 5 порядків) збільшується їх електропровідність за механізмом іонної провідності. Кристал переходить у інший стан. Для AgI цей стан історично одержав назву  $\alpha$  - фази ( $\alpha$  - модифікації). Схематично структура  $\alpha$  -

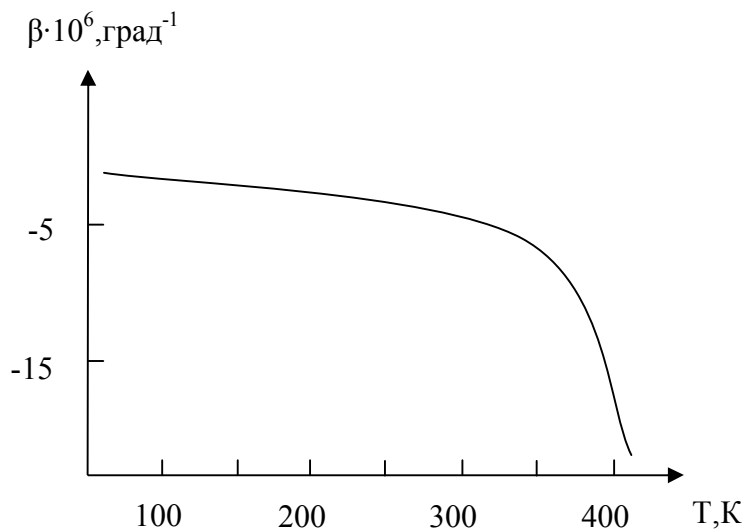


Рис. 6

має додатні значення у температурному інтервалі 523 - 773 К. Коефіцієнт розширення  $\beta$  - AgI є від'ємним при температурах 86 - 421 К. Починаючи з  $T \sim 370$  К, абсолютне значення від'ємного ТКЛР прогресивно зростає (рис. 6) [7].

Різке падіння ТКЛР пов'язане з поліморфним  $\beta \rightarrow \alpha$  перетворенням, яке супроводжується зменшенням об'єму на 5,4%. Поява від'ємного ТКЛР у  $\beta$ - та  $\gamma$ - йодиду срібла викликана особливостями фононного спектру. Якщо вважати, що при  $T \sim 300 - 400$  К усі частоти фононного спектру  $\beta$ - і  $\gamma$ -фаз збудженні, то у цьому випадку за високотемпературну межу параметра Грюнайзена можна прийняти  $\gamma$  при  $T \approx 300$  К, яке має від'ємне значення. Поява області додатніх значень коефіцієнта розширення у  $\gamma$  - AgI пов'язана з існуванням групи поперечних оптичних коливань низької частоти. При температурах 80 - 110 К внесок у теплове розширення цих коливань і поздовжніх акустичних коливань, який є додатнім,

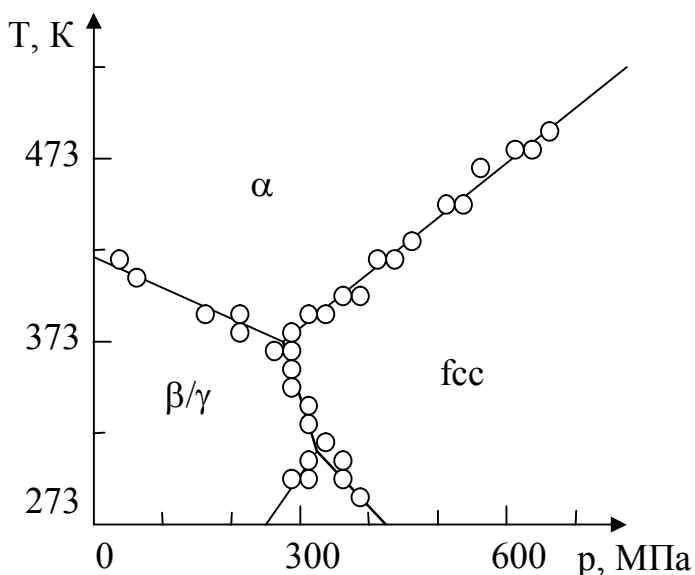


Рис. 7

модифікації AgI подана на рис 5.

Відомо чотири кристалографічні модифікації йодиду срібла AgI. Одна з них -  $\delta$ -модифікація стабільна при тисках вище 3550 атм.  $\beta$ - і  $\gamma$ -модифікації стабільні нижче 423 К.  $\beta$  - AgI має структуру в'юрциту;  $\gamma$  - AgI структуру сфалериту.

Коефіцієнт розширення  $\alpha$  - AgI

дещо перевищує від'ємний внесок поперечних акустичних коливань. В результаті коефіцієнт розширення стає додатнім. При підвиженні температури внесок поперечних акустичних коливань знову зростає, і коефіцієнт розширення стає від'ємним.

Завдяки поєднанню комплексу властивостей полімерної матриці та наповнювача температурна залежність ТКЛР може набувати нетривіального характеру. Так у ПХТФЕ - AgI та лентаплат - AgI в околі температури фазового перетворення наповнювача спостерігається явище термічно

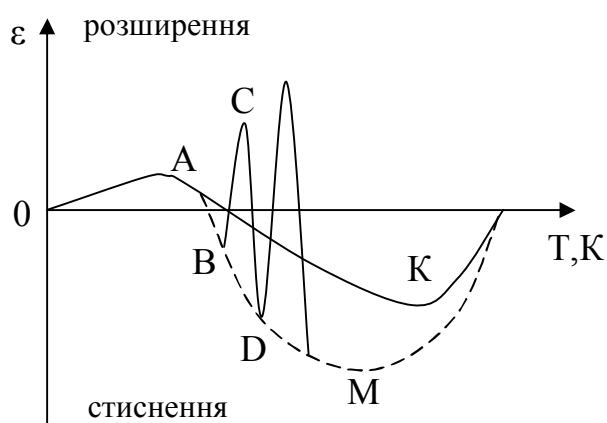


Рис. 8

частинок наповнювача, породжує на межі поверхні їх розділу інтенсивну зміну (зменшення) внутрішнього тиску  $\Delta p$ .

Згідно з фазовою діаграмою  $T_c = f(p)$  (рис. 7) [11] зменшення тиску  $\Delta p$  веде до зростання температури  $T_c$  фазового переходу за тисків  $p < 3000 \cdot 10^5$  Па.

Наявність аномальної (спадної) ділянки (АК) функціональної залежності  $T_c = f(p)$  для AgI (рис. 8) є однією з необхідних умов збудження системи в процесі нагрівання, що призводить до виникнення термічно стимульованих коливань лінійних розмірів.

Як видно з рис. 8, при нагріванні до температури початку фазового переходу наповнювача (точка А) теплове розширення незначне (ОА). В області температури фазового переходу композиційний матеріал починає швидко скорочуватись за рахунок переважаючого в порівнянні з розширенням полімеру стиснення наповнювача, що фіксується кривою стиснення (АК).

При збільшенні концентрації наповнювача інтенсивність скорочення зразка зростає, що фіксується зміною крутизни відрізка кривої АВ, що пов'язана зі швидкістю стиснення частинок наповнювача і розширенням полімеру в граничних шарах. Якщо крутизна відрізка кривої АВ, наприклад в околі точки В, стає більшою від критичної (за даної швидкості нагрівання ( $v > v_{кр}$ )), що визначається співвідношенням концентрації наповнювача і полімеру, то температура фазового переходу  $T_c$ , яка для AgI пов'язана з аномальною

функціональною залежністю  $T_c = f(p)$ , в точці В за умов закритичного падіння тиску  $\left(\frac{dp}{dl}\right)$

зростає. В результаті процес фазового перетворення припиняється. Отже, припиняється і процес стиснення частинок наповнювача. В результаті композиційний матеріал починає розширюватись за рахунок переважаючого розширення полімерної складової (рис. 8, відрізок ВС). Розширення полімеру зумовлює зростання тиску на частинки наповнювача. Це, в свою чергу, призводить до пониження температури фазового переходу AgI і до відновлення процесу фазового перетворення. Він супроводжується стисненням наповнювача і композиційного матеріалу в цілому (рис. 8, відрізок CD). Далі процес повторюється. Таким чином, в умовах, коли крутизна ділянки ВМ вище критичної (рис. 8), система збуджується. В ній у процесі нагрівання виникають термічно стимульовані коливання лінійних розмірів композиційного матеріалу. Коливання є нелінійними з причини нелінійності

стимульованих коливань розмірів низької частоти [3 - 5].

В процесі нагрівання в околі температури фазового переходу AgI значне зменшення розмірів частинок наповнювача за одночасного інтенсивного розширення полімеру, що входить до граничних поверхневих шарів навколо

дилатометричних змін в околі температури фазового переходу наповнювача (рис. 8, відрізок АМ). Експериментально було встановлено, що в системі ПХТФЕ – AgI, коливання збуджуються в зразках з концентрацією наповнювача  $60 \leq \varphi \leq 68$  % (об.) при швидкості нагрівання  $0,022 \leq \nu \leq 0,075 \frac{K}{c}$ , а в системі пентапласт – AgI – при концентраціях  $3 \leq \varphi \leq 42$  % (об.) ( $\nu = 0,043 \frac{K}{c}$ ).

*Опис приладу.*

Як відомо, прилади для визначення температурних коефіцієнтів розширення (дилатометри) можна поділити на дві групи. Одні з них призначені для абсолютних вимірювань ТКЛР, тобто безпосередніх вимірювань лінійних розмірів зразків при різних температурах. Інші дилатометри призначені для проведення відносних вимірювань, коли для визначення ТКЛР тіл використовується метод порівняння з еталоном, теплове розширення якого відоме (визначене абсолютним методом). Переважна кількість конструкцій дилатометрів заснована на принципі відносних вимірювань.

Окрім дилатометрів, виготовлених за стандартними схемами, існує значна кількість модифікованих схем. Розглянемо одну з таких схем, яка поєднує в собі частини модифікованого дилатометра індукційного типу та кварцевого дилатометра, в якому замість кварцу використано інвар. Блок-схема такого лінійного дилатометра з електромагнітним (індукційним) індикатором довжини подана на рис 9.

Лінійний дилатометр складається з термокриокамери, що виготовлена з інвару – сплаву з малим власним ТКЛР, яка складається з контейнера для зразка 1, зразка 2, штока 3, платформи з немагнітного матеріалу 4, нагрівника 5, охолоджувача 6 та вимірювальної

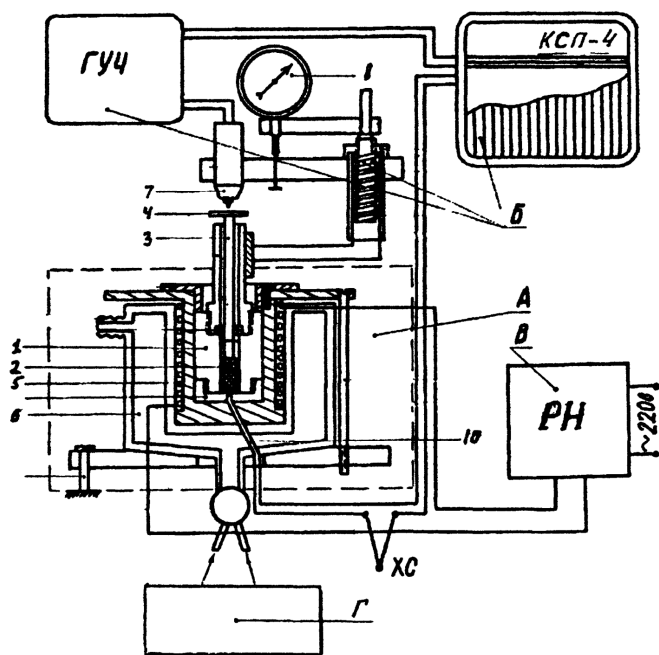


Рис. 9

системи Б. Вимірювальна система включає в себе: індикатор вимірювача довжини 7, підсилювач ГУЧ, диференціальну термопару 10, «гарячий» спай якої перебуває в контакті зі зразком, а «холодний» спай (ХС) знаходиться в посудині Дьюара з танучим льодом; блок живлення 8 з годинниковим механізмом; самозаписуючий потенціометр КСП-4.

Джерело живлення разом із годинниковим механізмом забезпечує подання на нагрівник наростаючої в часі напруги, що в свою чергу дає



можливість здійснити заданий темп нагрівання, коли температура зростає пропорційно до часу (швидкість нагрівання задається перед початком досліду). При нагріванні лінійні розміри зразка зростають, зразок піднімає шток 3 з платформою 4. Індикатор-вимірювач довжини 7 та підсилювач ГУЧ забезпечують вимірювання відстані між платформою 4 та індикатором 7, тобто фіксують зміну розміру зразка.

Принцип дії індикатора-вимірювача довжини базується на вимірюванні індуктивності котушки, що входить до його складу. Наближення платформи 4 до індикатора 7 призводить до збільшення індуктивності, оскільки при цьому платформа відіграє роль осердя котушки, що, в свою чергу, викликає зміну вихідного сигналу підсилювача ГУЧ. Одночасно фіксується температура зразка за допомогою диференціальної термопари. Сигнали термопари та системи виміру довжини зразка подаються на потенціометр КСП-4 для запису на його діаграмній стрічці.

Не дивлячись на те, що вимірювальна комірка виготовлена з матеріалу з малим ТКЛР, наявність температурного поля по осі системи все ж призводить до розширення комірки для зразка та штоку. Для градуювання вимірювальної комірки та визначення показів її лінійного розширення вимірюють теплове розширення еталонних матеріалів, тобто матеріалів, теплове розширення яких визначене абсолютним методом. Результати вимірювання використовують для внесення поправок до співвідношень, що даються теорією.

Так, вимірювання ТКЛР плавленого кварцу для даного дилатометра призводить до співвідношення (за яким визначається і ТКЛР об'єкту дослідження):

$$\alpha_{\text{ист}} = \alpha_{\text{вим}} + \alpha^*,$$

де -  $\alpha^* = \frac{0,016}{260l_{\text{зр}}}$ , де -  $l_{\text{зр}}$  - довжина зразка, виміряна в мм.

#### *Хід роботи*

1. Підготувати зразок для дослідження.
2. Викрутити нижню частину комірки та, вимірявши довжину досліджуваного зразка, помістити його в комірку.
3. Помістити та зафіксувати комірку в термокриокамері.
4. Заповнити об'єм посудини Д'юара сумішшю води з танучим льодом та помістити туди холодний спай термопари.
5. Ввімкнути в мережу блок вимірювання довжини. Прогріти його протягом 20-25 хв.
6. Вмістити в проміжок між платформою та штоком еталонну пластину товщиною 100 мкм та ручкою "Чутливість" встановити стрілку вимірювального приладу на позначку шкали "100 мкм".
7. Вийняти пластину, привести індикатор-вимірювач довжини у контакт з платформою. Ручкою "Встановлення 0" встановити стрілку індикатора-вимірювача довжини на позначку шкали "0 мкм".
8. Відтворити дії відповідно до пунктів 6 та 7 кілька разів, доки не буде досягнуто товщини проміжку між платформою та штоком датчика зміни довжини, що відповідає показам вимірювального приладу.

9. Ввімкнути тумблер “Прилад” самозаписуючого потенціометра КСП-4. Прогріти його протягом 2 – 3 хв.

10. Ввімкнути блок живлення та годинниковий механізм.

11. Ввімкнути тумблери “Нагрівання термодіаграми” та “Діаграма” потенціометра КСП-4.

12. Записувати покази приладу до досягнення температури 463 К для системи ПХТФЕ – AgI та 443 К для системи пентапласт – AgI.

13. За допомогою таблиці та лінійки визначити на діаграмній стрічці температуру через кожні 5 К. Для кожного значення температури знайти відповідні значення видовження  $\Delta l$  зразка в мм, а потім перевести її в мкм.

14. Занести значення температури  $T$  та видовження  $\Delta l$  зразка у таблицю.

15. Користуючись записами на діаграмній стрічці, визначити температурну залежність ТКЛР зразка полімерної композиції та побудувати графік.

16. Користуючись записами на діаграмній стрічці визначити параметри автоколивної системи: амплітуди та півперіоди коливань.

17. Занести одержані значення  $A$ ,  $T$ ,  $T/2$  у таблицю.

18. Оцінити похибки вимірювань та зробити висновки.

Як приклад показано отримані результати досліджень системи пентапласт – AgI.

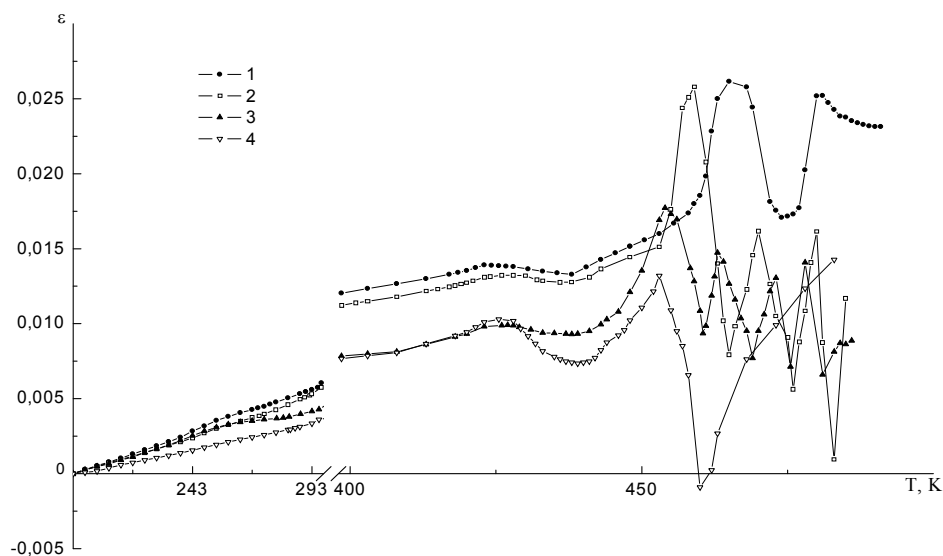


Рис. 10. Температурна залежність відносного видовження композитів системи пентапласт – AgI 1 – 3 %, 2 – 12 %, 3 – 20 %; 4 – 36 % при швидкості нагрівання 0,043 К/с

Таблиця 1. параметри і умови збудження термічно стимульованих коливань лінійних розмірів ПКМ системи та пентапласт – AgI.

$\varphi, \%$	Період коливань, $\tau$ , с			Амплітуда, $2A, (\Delta l/l) \cdot 10^4$		
	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$2A_1$	$2A_2$	$2A_3$
0	–	–	–	–	–	–
3	907	313	–	128,7	81,3	–
8	734	286	–	131,2	97,3	–
12	694	203	144	129,8	87,8	105,6
17	712	187	133	118,7	93,1	72,5
20	704	169	110	85,4	70,7	59,5
36	608	–	–	58	–	–
42	225	–	–	18,1	–	–
50	–	–	–	–	–	–

*Контрольні запитання*

*I рівень:*

1. Що називається ТКЛР?
2. Записати відомі вам формули для обчислення ТКЛР.
3. Що таке коливальний процес? Які умови його виникнення?
4. Які ви знаєте види коливань?
5. Як називаються прилади для дослідження теплового розширення фізичних тіл?
6. Якої системи прилад для дослідження теплового розширення використовується у роботі?
7. Наведіть приклади автоколивальних систем з механіки та електрики.

*II рівень:*

8. Чому коефіцієнти лінійного та об'ємного розширення до склування полімеру мають менші значення, ніж після склування?
9. Розкрити фізичний зміст процесу теплового розширення твердих тіл.
10. Що таке параметр Грюнайзена? Розкрити його фізичний зміст.

*III рівень:*

11. Чи можливе від'ємне значення ТКЛР?
12. Чи можлива рівність нулю ТКЛР?
13. Розкрити фізичний зміст від'ємного значення ТКЛР.
14. Розкрити фізичний зміст процесу виникнення термічно стимульованих коливань лінійних розмірів у полімерних композиціях, що містять наповнювачі з аномальною дилатометричною поведінкою.
15. Чим відрізняються вимушені коливання і коливання в автоколивних системах?
16. Від яких факторів залежать параметри термічно стимульованих коливань лінійних розмірів полімерних композицій?
17. За яких умов можуть збуджуватись термічно стимульовані коливання лінійних розмірів в полімерних композиціях?
18. Чи зміниться температурний інтервал фазового переходу наповнювача в складі полімерної композиції при збудженні коливань?

### *Питання охорони праці, техніки безпеки та протипожежної техніки*

1. При виконанні лабораторної роботи слід дотримуватись загальних правил охорони праці, техніки безпеки та протипожежної техніки.
2. Не дозволяється залишати установку, що працює в автоматичному режимі, до завершення експерименту. Після нагрівання до температури 463 К установку виключити з електромережі.
3. Не виймати досліджуваний зразок з комірки доки вона не охолоне до кімнатної температури.

На підставі вищевикладеного, можна зробити висновок: при підготовці даної роботи була зроблена спроба розв'язання актуального в наш час завдання – включення найновітніших наукових досягнень фізики полімерів у навчальний процес. Важливість подальшого розвитку знань у даній галузі та необхідність впровадження результатів досліджень в цій області у навчальний процес пояснюється тим, що відкрите явище збудження термічно стимульованих коливань лінійних розмірів полімерних композицій є яскравим підтвердженням вагомому внеску фізичної складової взаємодії компонентів, зумовленою різницею їх ТКЛР, у загальну фізико-хімічну взаємодію на межі поверхні їх розділу та формування структури і властивостей полімерних композицій.

### **Список використаної літератури**

1. Гуревич Ю.Я. Твердые электролиты. М.: Наука, 1986. – 174 с.
2. Укше Е.А., Букун Н.Г. Твердые электролиты. М.: Наука, 1977. – 176 с.
3. Левандовський В.В., Горбик П.П., Чуйко О.О., Шут М.І., Янчевський Л.К., Гаркуша О.М., Рокицький М.О. Явище збудження дилатометричних автоколивань у високонаповнених композиційних матеріалах. // Наукові записки НПУ імені М. П. Драгоманова. Фізико-математичні науки.-2002, № 3. – С.9-16.
4. Гаркуша О.М., Горбик П.П., Левандовський В.В., Мазуренко Р.В., Рокицький М.О., Янчевський Л.К., Чуйко О.О. Термічно стимульовані коливання розмірів у системі поліхлортрифторетилен – дисперсний йодид срібла // Доп. НАН України. - 2004. - №5. – С. 143-146.
5. Рокицький М.О., Левандовський В.В., Малежик П.М., Шут А.М., Рокицька Г.В. Термічно стимульовані коливання лінійних розмірів у матрично-дисперсній системі пентапласт – AgI. // Фізика аеродисперсних систем. – 2011, Вып. 48. – С. 37–43.
6. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.1. К.: Техніка, 1999. – 536 с.
7. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974. – 292 с.
8. Годовский Ю.К. Теплофизика полимеров. М.: Химия, 1982. – 280 с.
9. Перепечко И.И. Введение в физику полимеров. М.: Химия, 1978. – 312 с.
10. Мулин Ю.А., Ярцев И.К. Пентапласт. – Л.: Химия, 1975. – 120 с.
11. Mellander B.E. Phase Diagram of Silver Iodide in the Pressure Range 2.5 – 10 kbar and the Temperature Range 4 – 330 °C / Mellander B.E., Bowling J.E., Baranowski. // Physica Scripta. – 1980. – Vol. 22. - P. 541–544.