

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

ПРАКТИКУМ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

З ДИСЦИПЛІНИ "НОВІ МАТЕРІАЛИ"

Частина II

Київ, НТУУ „КПІ”, 2009 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

ПРАКТИКУМ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З ДИСЦИПЛІНИ "НОВІ МАТЕРІАЛИ"

Частина II

"В'язкопружні властивості полімерних
та композиційних матеріалів при тривалому навантаженні"

Для студентів спеціальності
"Динаміка та міцність машин"

Затверджено
на засіданні Методичної Комісії
ММІ НТУУ "КПІ".
Протокол № 9 від 25.05.2009 р.

Київ, НТУУ "КПІ", 2009 р.

Практикум з лабораторних робіт з дисципліни "Нові матеріали". Частина II.
"В'язкопружні властивості полімерних та композиційних матеріалів при
тривалому навантаженні ". Для студентів спеціальності "Динаміка та міцність
машин" // Шидловський М.С., Шпак Д.Ю. - К.: НТУУ "КПІ", 2009. - 45 с.

Навчальне видання

Практикум з лабораторних робіт з дисципліни "Нові матеріали"

Частина II.

"В'язкопружні властивості полімерних та композиційних матеріалів при
тривалому навантаженні"

Для студентів спеціальності

"Динаміка та міцність машин"

Відповідальний редактор

М.І. Бобир

Рецензент:

О.Ф. Луговський

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.

Розвиток різних галузей сучасної техніки вимагає застосування нових конструкційних полімерних матеріалів і композитів на їх основі. Корозійна стійкість, невелика вага, висока питома міцність таких матеріалів досить часто роблять їх незамінними при проектуванні різноманітних конструкцій і сприяють зменшенню матеріаломісткості виробів з них.

В зв'язку з цим спеціалісти з питань міцності повинні вміти застосовувати сучасні методи випробувань для визначення основних механічних характеристик зазначених матеріалів та методи обробки експериментальних результатів.

В лабораторних роботах з дисципліни "Нові матеріали" (частина II) визначаються основні в'язкопружні та реологічні характеристики полімерних та композиційних матеріалів. В більшості робіт враховується температурний фактор.

Протокол випробувань складається студентами індивідуально відповідно до діючих стандартів. Він оформлюється на аркушах паперу формату А4 (210мм x 297мм). Схеми та графіки виконуються на міліметровому папері того ж формату. До протоколів лабораторних робіт, виконаних на ЕОМ, додаються програми й результати розрахунків (роздруки). Всі фізичні величини, що зустрічаються в роботі, повинні бути виражені в міжнародній системі одиниць *SI*.

У кожному протоколі обов'язково повинні бути відображені такі відомості:

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Прилади та обладнання, що використовуються, режими випробовування (швидкість навантаження, температура, час випробування та ін.).
4. Конкретна назва випробуваного матеріалу (або матеріалів), шифр або марка матеріалу, тип і розміри зразків.

5.Стислий опис методики проведення випробувань.

6.Таблиці із заголовками, в яких подаються виміряні або обчислені величини та їх розмірності.

7.Графіки із зазначенням на координатних осях величин, що відбиваються, та їх розмірностей. Під кожним графіком повинен бути пояснюючий підпис (назва матеріалів, стислий опис досліджуваних процесів, умови випробувань та ін.).

8.Описання методів розрахунку, формули та результати розрахунків. Остаточні результати підкреслити.

9.Стислі відомості про випробувані матеріали:

клас матеріалу (лінійний, сітчастий, наповнений тощо);

фазовий стан (кристалічний, аморфний, частково-кристалічний);

фізичний стан (склоподібний, високоеластичний та ін.);

галузі застосування;

методи отримання, режими обробки;

довідкові дані (границя міцності, максимальне видовження, модуль пружності, ударна в'язкість, температурні характеристики, густина, твердість та ін.).

10.Висновки по проведеній роботі.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.

t – час;

$\mathcal{E}(t)$ – повна деформація;

\mathcal{E}_{np} – миттєво пружна деформація;

$\mathcal{E}_{ve}(t)$ – високоеластична деформація;

\mathcal{E}_{nl} – миттєво пластична деформація;

$\mathcal{E}_T(t)$ – незворотньо-в'язка деформація;

$\sigma(t)$ – нормальне напруження або кульовий тензор напруження;

E_0 – миттєвий модуль пружності;

η – коефіцієнт в'язкості;

\mathcal{E}_0 – постійна деформація (випробування на релаксацію напружень);

τ – час релаксації у моделі Максвелла;

$E(t)$ – модуль релаксації;

E_i, τ_i – коефіцієнти узагальненої моделі Максвелла;

σ_0 – постійне напруження (випробування на повзучість);

λ – час пружної післядії у моделі Кельвіна-Фойгта;

$I(t)$ – функція повзучості (податливість);

I_i, λ_i (або τ_i) – коефіцієнти узагальненої моделі Кельвіна-Фойгта;

I_0 – миттєва податливість;

S_{ij} – компоненти девіатора тензора напружень;

e_{ij} – компоненти девіатора тензора деформацій;

$\sigma(t)$ – кульовий тензор напружень;

$\theta(t)$ – об'ємна деформація;

R_C – зсувний модуль релаксації;

R_V – об'ємний модуль релаксації;

P_C – функція зсувної повзучості;

P_V – функція об'ємної повзучості;

Γ_C – функція швидкості зсувної релаксації;

Γ_V – функція швидкості об'ємної релаксації;

K_C – функція швидкості зсувної повзучості;

K_V – функція швидкості об'ємної повзучості;

G – модуль зсуву;
 B – об'ємний модуль пружності;
 ν_0 – коефіцієнт Пуассона;
 Γ – функція швидкості релаксації;
 K – функція швидкості повзучості;
 A, α, β – параметри функцій Γ та K ;
 T – температура;
 T_0 – температура зведення;
 $a_T(T)$ – температурна функція зсуву в методі температурно-часової аналогії;
 a, b – коефіцієнти рівняння Вільямса-Ландела-Феррі (ВЛФ);
 t' – зведений час;
 $\Delta l(t)$ – видовження зразків при випробуваннях на повзучість;
 l_0 – початкова (робоча) довжина зразків;
 P_K – постійно діюче навантаження при випробуваннях на повзучість;
 F_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка;
 σ_l – границя лінійної в'язкопружності матеріалу.

1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО В'ЯЗКОПРУЖНУ ПОВЕДІНКУ ПОЛІМЕРНИХ І КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ДОВГОЧАСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ В РОБОЧИХ ДІАПАЗОНАХ ТЕМПЕРАТУР

1.1 Складові частини загальної деформації

Повна деформація полімеру складається з таких видів деформації:

миттєвопружної ε_{np} , що поширюється в матеріалі зі швидкістю звуку.

Вона пов'язана зі зміною валентних зв'язків або кутів, тобто з малою зміною міжмолекулярних та міжатомних відстаней;

вискоеластичної (в'язкопружної або затриманої) ε_{ve} , що є результатом зміни середньостатистичної зігнутості молекул (конформаційні зміни) під дією напружень. Внаслідок високої в'язкості конструкційних полімерів цей процес проходить відносно повільно. Також повільно відновлюються початкові розміри об'єкта після зняття навантаження. Розвиток ε_{ve} , що узгоджується з релаксаційним механізмом, залежить від тривалості навантаження та температури;

миттєвопластичної (незворотної) ε_{nl} , яка виникає одночасно з миттєвопружною;

незворотньо-в'язкої (типу течії) ε_T , яка має місце при значних напруженнях і тривалих навантаженнях. При температурах менших від температури переходу у в'язкотекучій стан вона пов'язана з механізмом високоеластичної деформації, оскільки напрям зміни конфігурації ланцюгових молекул під дією напружень може привести до розпаду флуктуаційної сітки та зміщенню центру ваги молекул, тобто до дійсної (незворотної) течії. Таким чином, повна деформація полімеру

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{np} + \varepsilon_{ve}(t) + \varepsilon_{nl} + \varepsilon_T(t)$$

де t - заданий час.

Переважання тієї чи іншої деформації залежить від умов (температури, величини та виду навантаження, часу, швидкості деформування) та стану матеріалу (ступінь кристалічності, молекулярна орієнтація, термообробка, старіння та ін.).

Більшість конструкційних полімерів працюють в інтервалі температур, які відповідають скловидному стану (підстан вимушеної еластичності). В цьому підстані матеріал має високу питому міцність і пружність. Поряд з пружністю в засклованих полімерах виявляються помітні в'язкопружні деформації, які за абсолютними величинами можуть в кілька разів перевищувати миттєвопружні. Менше значення в цьому підстані відіграють миттєвопластичні й зовсім невелике - незворотні деформації типу течії, тобто (рис. 1)

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{PP} + \varepsilon_{BE}(t).$$

1.2. Механічні моделі в'язкопружного тіла

Для побудови рівнянь, які описують в'язкопружну поведінку матеріалів, суттєву допомогу можуть надати механічні моделі, що складаються з пружних (у погляді пружин) та в'язких (демпфери) елементів. Діючі на зазначені елементи сили моделюють напруження σ , деформації пружини моделюють пружні деформації ε_{np} , а деформації демпферів-в'язкі деформації $\varepsilon_{ve}(t)$.

Зв'язок між напруженнями і деформаціями для пружного елемента (рис.2а) описується законом Гука

$$\sigma = E_0 \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

де E_0 - миттєвий модуль пружності.

Для в'язкого елемента (рис.2б) виконується закон течії Ньютона

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (2)$$

де η - коефіцієнт в'язкості демпфера.

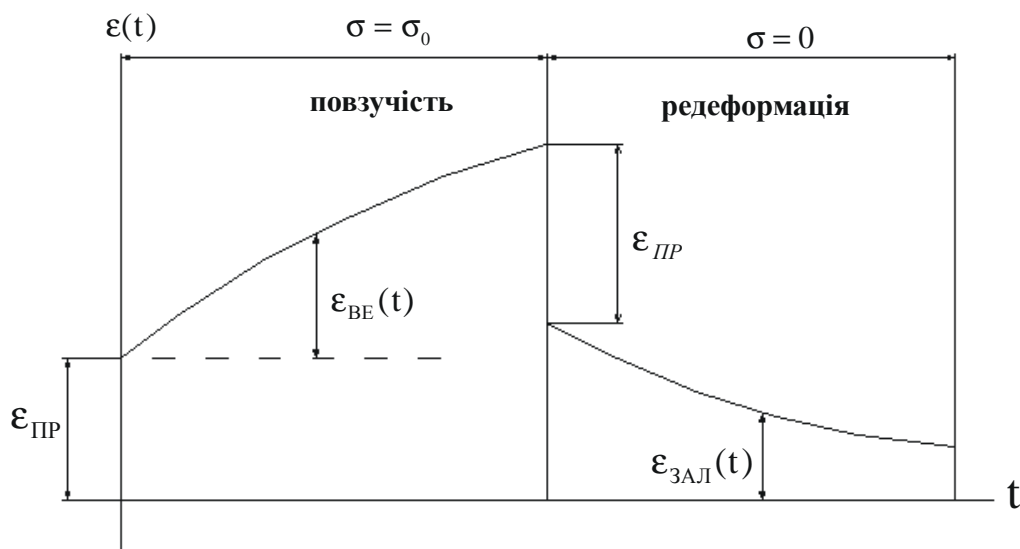


Рис 1. Типова крива повзучості та деформації відновлення розмірів зразка в'язкопружного матеріалу, що знаходиться в склоподібному стані, при розтягу: σ_0 - постійно діюче напруження; $\epsilon(t)$ - повна деформація зразка; $\epsilon_{пр}$ - пружна деформація; $\epsilon_{ве}(t)$ - високоеластична деформація; $\epsilon_{зал}(t)$ - залишкова (та, що не зникла в даний час t) деформація.

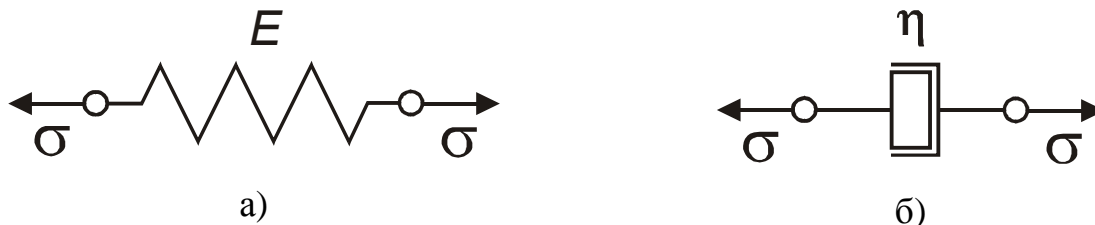


Рис 2. Пружний (E) та в'язкий (η) елементи

Ці елементи можна з'єднувати послідовно або паралельно. У першому випадку маємо механічну модель Максвела (рис.3а). Диференціальне рівняння, що відповідає цій моделі, має вигляд:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E_0} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \cdot \sigma \quad (3)$$

Інтегруючи рівняння (3) при $\epsilon = \epsilon_0 = const$ (релаксація напружень при постійній деформації), маємо з урахуванням початкових умов (при $t=0 \sigma = \sigma_0$)

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \exp(-t/\tau), \quad (4)$$

де $\tau = \eta / E_0$ - час релаксації, тобто час, за який напруження зменшуються в e раз.

Це рівняння можна записати за аналогією із законом Гука в операторному вигляді:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot E(t), \quad (5)$$

де ε_0 - постійна деформація;

$E(t) = E_0 \cdot \exp(-t/\tau)$ - модуль релаксації (або функція релаксації).

Більш точний збіг з експериментальними даними можна отримати, використовуючи узагальнену модель Максвелла (рис.3б), що являє собою набір пружних та в'язких елементів. Рівняння, що відповідає цій моделі, має вигляд:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot \sum_{i=1}^n E_i \cdot \exp(-t/\tau_i), \quad (6)$$

де E_i - миттєвий модуль пружності i -го елемента; $\tau_i = \eta_i / E_i$ - час релаксації i -го елемента.

Типова крива релаксації напружень при постійній деформації, що описується рівнянням (6), зображена на рис.4.

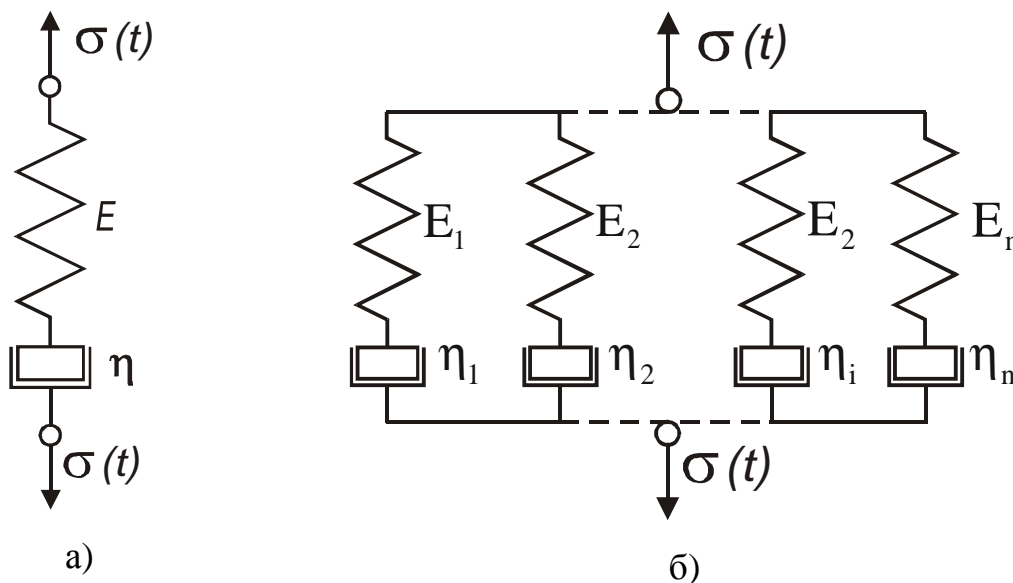


Рис 3. Модель Максвелла (а) та узагальнена модель Максвелла (б)

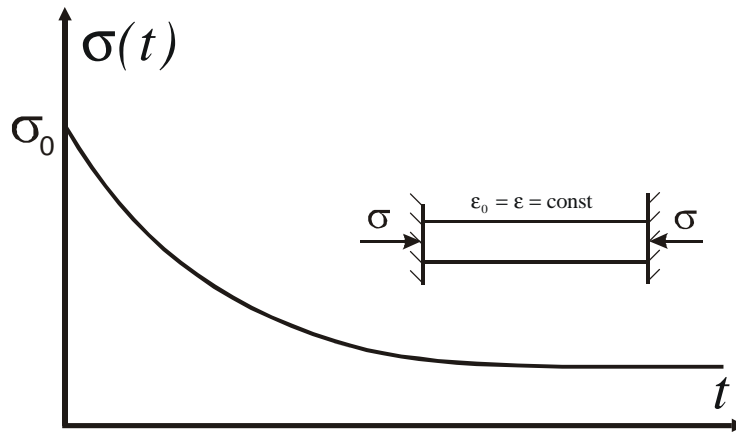


Рис 4. Крива релаксації напружень у в'язкопружному матеріалі, якій відповідає узагальнена модель Максвелла та рівняння (6).

При використанні операторної форми запису (5) модуль релаксації

$$E(t) = \sum_{i=1}^n E_i \cdot \exp(-t / \tau_i). \quad (7)$$

При паралельному з'єднанні елементів (рис.5а) маємо модель Кельвіна-Фойгта, диференціальне рівняння для якої має такий вигляд:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (8)$$

Інтегруючи це рівняння при $\sigma = \sigma_0 = const$ (випробування на повзучість при постійно діючому напруженні) з урахуванням початкових умов (при $t=0$ $\varepsilon = 0$), маємо:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} \cdot [1 - \exp(-t / \lambda)], \quad (9)$$

або
$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 [1 - \exp(-t / \lambda)], \quad (10)$$

де $\lambda = \eta / E$ - час пружної післядії, або час запізнювання.

Рівняння (9) можна записати в операторному вигляді:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 I(t), \quad (11)$$

де $I(t) = \frac{1}{E_0} [1 - \exp(-t / \lambda)]$ - функція повзучості, або податливість

матеріалу.

Для підвищення точності опису використовують узагальнену модель Кельвіна-Фойгта (рис. 5 б). Рівняння, що описує повзучість згідно такої моделі, має вигляд:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \lambda_i)], \quad (12)$$

де $\lambda_i = \eta_i / E_i$ - час запізнення і-го елемента; $I_i = 1 / E_i$.

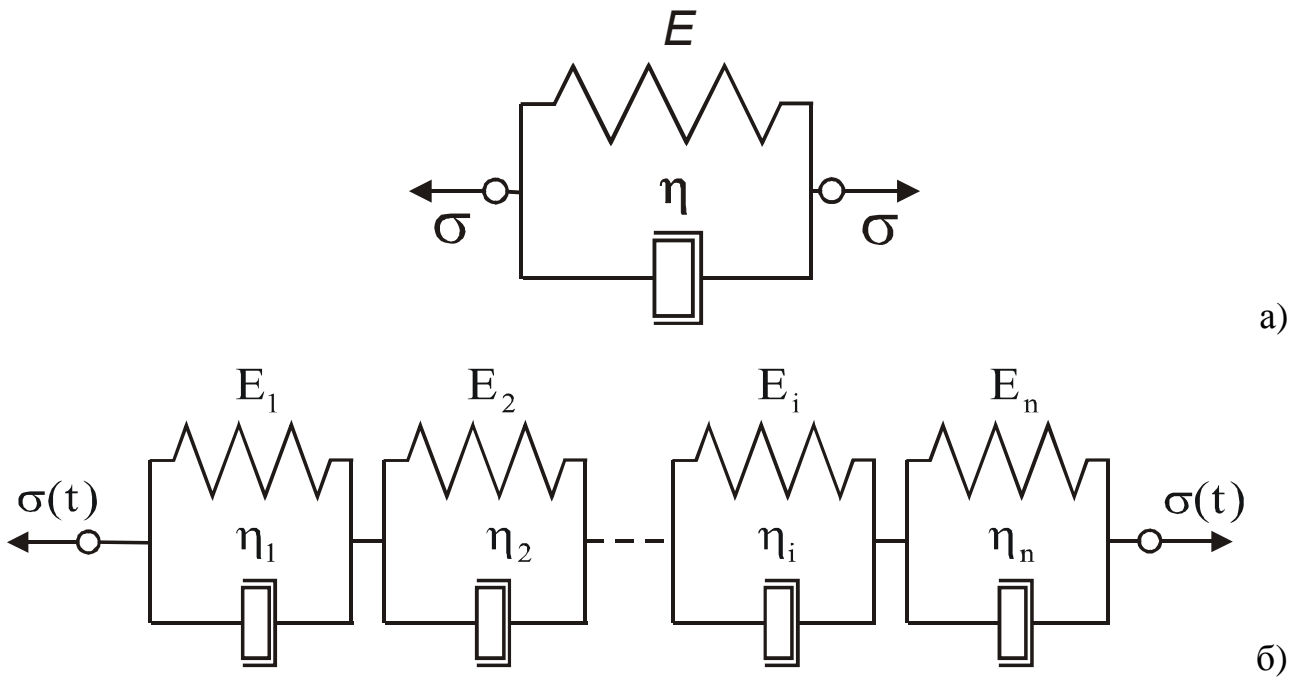


Рис 5. Модель Кельвіна – Фойгта (а) та узагальнена модель Кельвіна- Фойгта (б)

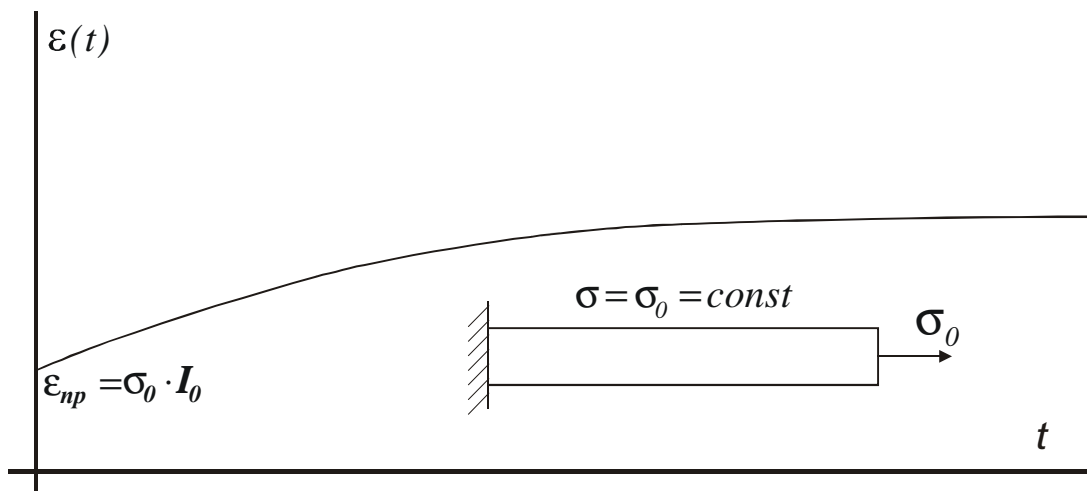


Рис 6. Крива повзучості в'язкопружного матеріалу, якій відповідає узагальнена модель Кельвіна-Фойгта та рівняння (14)

При використанні операторного рівняння (11)

$$I(t) = \sum_{i=1}^n I_i \cdot [1 - \exp(-t / \lambda_i)]. \quad (13)$$

Більш точний опис експериментальних кривих повзучості можна одержати, якщо в узагальнену модель Кельвіна-Фойгта ввести елемент з $\lambda_0 = 0$. У цьому випадку рівняння (12) та (13) запишуться у вигляді:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 I_0 + \sigma_0 \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \lambda_i)]; \quad (14)$$

$$I(t) = I_0 + \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \lambda_i)], \quad (15)$$

де $I_0 = 1 / E_0$ - миттєва податливість.

Типова крива повзучості при постійно діючому напруженні, що описується рівнянням (14), зображена на рис. 6.

Відмітимо, що всі наведені рівняння виконуються лише в області лінійного деформування, тобто, якщо у будь-який момент часу модулі релаксації $E(t)$ не залежать від рівня деформації, а функції повзучості $I(t)$ не залежать від рівня напружень.

1.3. Основні рівняння спадкової лінійної в'язкопружності

В області лінійної в'язкопружності для опису реологічних процесів найбільш часто застосовують лінійну спадкову теорію Больцмана-Вольтера, рівняння якої має такий вигляд:

$$S_{ij}(t) = \int_0^t R_c(t-s) de_{ij}(s); \quad (16)$$

$$\sigma(t) = \int_0^t R_V(t-s) d\theta(s); \quad (17)$$

$$e_{ij}(t) = \int_0^t \Pi_c(t-s) dS_{ij}(s); \quad (18)$$

$$\theta_{ij}(t) = \int_0^t \Pi_V(t-s) d\sigma(s). \quad (19)$$

Тут S_{ij} і e_{ij} - компоненти дівіаторів тензорів напружень та деформацій;

$\sigma(t)$ - кульовий тензор напруження;

$\theta(t)$ - об'ємна деформація;

$R_C(t)$ і $R_V(t)$ - зсувні та об'ємні модулі релаксації;

$\Pi_C(t)$ і $\Pi_V(t)$ - функції зсувної та об'ємної повзучості.

Інтегруючи (16)-(19) частинами, одержуємо:

$$S_{ij} = 2G \cdot e_{ij}(t) - 2G \int_0^t \Gamma_C(t-s) \cdot e_{ij}(s) ds; \quad (20)$$

$$\sigma(t) = B \cdot \theta(t) - B \int_0^t \Gamma_V(t-s) \cdot \theta(s) ds; \quad (21)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2G} \cdot S_{ij}(t) + \frac{1}{2G} \int_0^t K_C(t-s) \cdot S_{ij}(s) ds; \quad (22)$$

$$\theta(t) = \frac{1}{B} \cdot \sigma(t) + \frac{1}{B} \int_0^t K_V(t-s) \cdot \sigma(s) ds, \quad (23)$$

де $G = \frac{E_0}{2(1 + \nu_0)}$ - модуль зсуву;

$B = \frac{E_0}{3(1 - 2\nu_0)}$ - об'ємний модуль пружності;

Γ_C і Γ_V - функції швидкостей зсувної та об'ємної релаксації;

K_C і K_V - функції швидкостей зсувної та об'ємної повзучості;

E_0 і ν_0 - миттєвий модуль пружності та коефіцієнт Пуассона.

При одновісному навантаженні та деформуванні в області лінійної в'язкопружності рівняння (20) та (22) набувають такого вигляду:

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) - E_0 \int_0^t \Gamma(t-s) \varepsilon(s) ds; \quad (24)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_0} \sigma(t) + \frac{1}{E_0} \int_0^t K(t-s) \sigma(s) ds, \quad (25)$$

де $\Gamma(t)$ - функція швидкості релаксації;

$K(t)$ - функція швидкості повзучості.

Приймаючи ядро K рівняння (25) у вигляді суми експоненціальних функцій, одержуємо співвідношення для апроксимації дослідних кривих повзучості в лінійній області при $\sigma = \sigma_K = const$;

$$\varepsilon(t) = \sigma_K \cdot I_0 + \sigma_k \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \tau_i)], \quad (26)$$

де $I_0 = 1 / E_0$ - миттєва податливість;

I_i, τ_i - коефіцієнти.

Зазначимо, що рівняння повзучості (26) повністю збігається з рівнянням (14), якщо замінити σ_K на σ_0 , а τ_i на λ_i .

Для описання процесів повзучості та релаксації використовують різні форми функцій K та Γ . Однією з найбільш розповсюджених та простих форм є слабосингулярне ядро:

$$\Gamma(t) = A e^{-\beta t} t^{\alpha-1} \quad (0 < \alpha < 1), \quad (27)$$

для якого при будь-якому t

$$\int_0^t A e^{-\beta t} t^{\alpha-1} dt \leq 1.$$

Його резольвента:

$$K(t) = \frac{e^{-\beta t}}{t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[A \tilde{\Gamma}(\alpha)^n]}{\tilde{\Gamma}(\alpha n)} t^{\alpha n}, \quad (28)$$

де $\tilde{\Gamma}(z) = \int_0^{\infty} \xi^{z-1} e^{-\xi} d\xi$ - гамма-функція.

Функції (27), (28) та їх інтеграли детально протабульовані, розроблені ефективні методи визначення параметрів α , β , A за експериментально одержаними кривими повзучості та релаксації [1].

1.4. Принцип температурно-часової аналогії

При підвищенні температури зростає рухомість макромолекул і зменшується час релаксації. Тому є можливість дуже довгий релаксаційний процес провести за порівняно короткий проміжок часу, якщо підвищити температуру. З цього виходить, що вплив часового фактору та температури на властивості в'язкопружних матеріалів, які знаходяться під навантаженням, еквівалентні. Ця закономірність одержала назву принципу температурно-часової аналогії (ТЧА).

Використовуючи цей принцип, можна здійснити екстраполяцію від малих до великих часів релаксації, що істотно скорочує час експерименту. Екстраполяція зводиться до того, що експериментальні криві релаксації (або повзучості), одержані при різних температурах, зсуваються горизонтальним переносом їх вздовж осі логарифму часу на деяку величину $\ln a_T$ до одержання єдиної узагальненої кривої.

Температурні залежності в'язкопружних властивостей можуть бути описані однією функцією a_T (температурна функція зсуву), що являє собою відношення значення часу релаксації при температурі T до значення часу релаксації при фіксованій температурі T_0 (температура зведення).

Для багатьох полімерів ця залежність може бути апроксимована рівнянням:

$$\ln a_T = c \frac{T - T_0}{T} \quad (29)$$

або

$$\ln a_T = \frac{a(T - T_0)}{b + (T - T_0)}, \quad (30)$$

де a і b - коефіцієнти .

Вираз (30) одержав назву рівняння ВЛФ (Вільямса-Ландела-Фері).

Використання принципу ТЧА дозволяє прогнозувати зміну деформаційних властивостей полімерів на тривалі строки (до декількох років) за результатами нетривалих випробовувань.

Таким чином, для терморелогічно простих матеріалів мають місце такі залежності:

$$I(t, T) \equiv I(t')|_{T=T_0}, \quad (31)$$

$$\tilde{E}(t, T) \equiv E(t')|_{T=T_0}, \quad (32)$$

де $I(t, T) = \varepsilon(t, T) / \sigma_0$; $E(t, T) = \sigma(t, T) / \varepsilon_0$ - функції податливості та модуля релаксації відповідно;

σ_0 та ε_0 - постійні напруження та деформації, які підтримуються в зразку під час експерименту;

$t' = t \cdot a_T$ - зведений час;

$a_T(T)$ - температурна функція зсуву.

Зв'язок між напруженнями, деформаціями, часом та температурою на основі принципу ТЧА можна отримати із співвідношень (4)-(7), (9)-(26) зміною t на t' та S на S' . До того ж при постійних температурах $t' = t \cdot a_T$; $S' = S \cdot a_T$, а при змінних -

$$t' = \int_0^t a_T dt; \quad S' = \int_0^t a_T ds.$$

Рівняння (26) при постійній температурі набуває вигляду:

$$\varepsilon(t) = \sigma_K \cdot I_0 + \sigma_K \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t \cdot a_T(T) / (\tau_i))]. \quad (33)$$

2. ОПИС, БУДОВА ТА ПОРЯДОК РОБОТИ З ОБЛАДНАННЯМ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЗУЧОСТІ ТА РЕЛАКСАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ В'ЯЗКОПРУЖНИХ МАТЕРІАЛІВ.

2.1. Випробувальна установка для вимірювання повзучості плівкових та листових полімерних матеріалів

Випробувальна установка, схема якої наведена на рис. 7, складається з п'яти горизонтально розташованих однакових секцій (на схемі показана лише одна), що надає можливості одночасно випробувати п'ять зразків, значно скорочуючи час вимірювань. Кожна секція обладнана системою навантаження та пристроєм для вимірювання видовження зразків. Усі секції розміщені у спільній термокамері, з якою зв'язана система регулювання та автоматичного підтримання заданої температури.

Зразки 11 закріплюються в нерухомих 8 та рухомих 13 затискувачах, які жорстко зв'язані з механічними системами індикаторів годинникового типу 2. Нерухомі затискувачі розташовані на кріпленнях 7, а індикатори - на кріпленнях 14. До ніжок індикаторів приєднані гнучкі тяги 17, через які за допомогою шківів 1 передається зусилля від вантажів 15 та піддонів 16.

Вимірювання видовження зразків здійснюється за допомогою індикаторів годинникового типу 2 з точністю ± 0.005 мм.

Порівняно велика довжина зразка (до 100 мм) практично усуває вплив на загальну деформацію "кінцевого ефекту" - подовжень матеріалу в затискувачах, а також підвищує точність вимірювання відносної деформації. Конструкція затискувачів дозволяє надійно закріплювати тонкі зразки товщиною від 0.02 мм, а також регулювати силу притискання. Співвісність затискувачів та підвищена жорсткість всієї системи є обов'язковими вимогами, що пов'язані з необхідністю здійснення одновісного навантаження зразків.

Загальна конструкція установки дає можливість проводити дослідження зразків шириною 10 мм та довжиною 100 мм при робочій температурі до 200°C

в умовах рівномірного нагріву по робочій частині зразка.

У термокамері 6 розташовані спіралі нагрівачів 10, контактний ртутний термометр 5 і вентилятор, призначений для перемішування повітря. Ртутним термометром керує низькострумне реле. Реле зв'язане з електромагнітним перемикачем, який працює в 2-х режимах: режимі нагріву, коли на обмотку спіралі подається підвищена напруга; режим підігріву, коли на обмотку спіралі подається понижена напруга. Дана система забезпечує точність підтримання температури $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ впродовж тривалого проміжку часу (до 1 місяця).

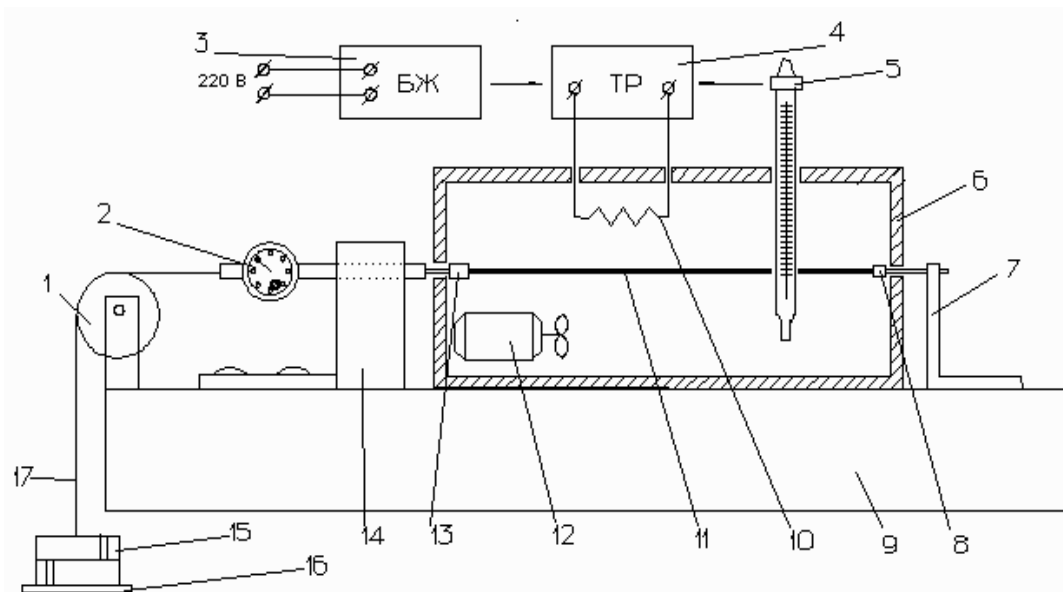


Рис. 7 Схема випробувальної установки для вимірювання деформації повзучості плівкових та листових полімерних матеріалів.

1 - шків з опорою; 2 - індикатор годинникового типу; 3 - блок живлення; 4 - терморегулятор; 5 - контактний термометр; 6 - корпус термокамери; 7 - кріплення для нерухомого затискувача; 8 - нерухомий затискувач; 9 - основа; 10 - спіраль нагрівача; 11 - зразок; 12 - перемішувач повітря; 13 - рухомий затискувач; 14 - кріплення індикатора годинникового типу; 15 - вантажі; 16 - піддон для вантажів; 17 - гнучка тяга.

2.2 Вимірювання деформацій повзучості за допомогою універсальної випробувальної машини TIRATEST-2151

Призначення, опис блок-схеми, режимів роботи, клавіатури введення даних та порядок роботи з випробувальною машиною TIRATEST-2151 наведені

в [3].

За допомогою програмного шаблону "Циклічне навантаження 1" можливо здійснювати запис кривих повзучості в циклічному та статичному режимах навантаження.

Цикл навантаження складається з:

- розтягу зразка з постійною швидкістю до заданого значення максимального навантаження F2;
- витримки зразка під постійним навантаженням F2;
- розвантаження зразка до заданого значення мінімального навантаження F1;
- витримки зразка під постійним навантаженням F1.

Далі цикли повторюються. Максимальне число циклів 64000. Значення видовжень зразків зчитують з таблю індикації деформації (див. [3]).

Вхідні дані програмного шаблону (INPUT)

- T1- час витримки зразка під мінімальним навантаженням F1, сек;
- T2 - час витримки зразка під максимальним навантаженням F2, сек;
- Z1 - число циклів, при якому визначається модуль пружності E1;
- Z2 - загальне число циклів, після досягнення якого випробування припиняється;
- DIV - площа поперечного перерізу зразка, мм;
- L0 - робоча довжина зразка, мм;
- F1 - значення мінімального навантаження, Н;
- F2 - значення максимального навантаження, Н;
- $\Delta 2$ - спад сили для розпізнання мікропроцесором моменту розриву зразка, Н.

Порядок введення даних описаний в [3].

За допомогою даної програми визначаються такі характеристики:

- NR - номер випробування;
- Z - загальне число проведених циклів;
- A1 - видовження при навантаженні F1 і числі циклів Z1,%;
- A2 - видовження при навантаженні F2 і числі циклів Z1, %;

- A1 - видовження при навантаженні F1 і числі циклів Z2, %;
A2 - видовження при навантаженні F2 і числі циклів Z2, %;
E1 - модуль пружності матеріалу при числі циклів Z1, МПа;
E2 - модуль пружності матеріалу при числі циклів Z2, МПа;

Ці дані виводяться на папір разом з протоколом або на табло 10 при натисканні клавіші "0".

Для випробування на повзучість в статичному режимі, тобто при одноразовому довготривалому навантаженні, приймаємо $Z1=Z2=1$; T2 дорівнює заданому часу експеримента; T1 та F1 вибираємо довільно.

2.3. Вимірювання релаксації напружень за допомогою універсальної випробувальної машини ТКАТЕСТ-2151

Запис кривих релаксації напружень в зразках у статичному та циклічному режимах здійснюється за допомогою програмного шаблону **"Циклічне навантаження 1"**.

Циклічне навантаження складається з:

- розтягу зразка з постійною швидкістю до заданого значення максимального навантаження F2;
- витримки зразка в умовах постійної деформації A2, що встановилась після досягнення навантаження F2 (при цьому зусилля в зразку зменшується);
- розвантаження зразка до заданого значення мінімального навантаження F1;
- витримки зразка в умовах постійної деформації A1, що встановилась після досягнення навантаження F1 (при цьому зусилля в зразку змінюється);

Далі цикли повторюються. Максимальне число циклів 64000.

Вхідні та вихідні дані програмного шаблону не відрізняються від шаблону **"Циклічне навантаження 1"** (див. вище).

Для випробування на релаксацію напружень в статичному режимі, тобто при одноразовому довготривалому деформуванні, приймаємо $Z1=Z2=1$; T2 дорівнює заданому часу експеримента; T1 та F1 вибираємо довільно.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.1

Побудова кривих повзучості. Визначення областей лінійності в'язкопружних властивостей матеріалів при різних температурах.

Мета роботи:

навчитися користуватися випробувальною установкою для вимірювань деформацій повзучості зразків полімерних матеріалів;

одержати криві повзучості полімерних матеріалів при різних температурах;

обчислити значення функцій повзучості та визначити області лінійності в'язкопружних властивостей матеріалів.

Прилади та обладнання: випробувальна установка для вимірювання повзучості плівкових та листових полімерних матеріалів або універсальна випробувальна машина TIRATEST-2151; штангенциркуль з ціною поділки 0.05 мм;

товщиномір з ціною поділки 0.001 або 0.002 мм.

Досліджувані матеріали: поліетилен (далі ПЕ), поліпропілен (ПП), полівінілхлорид (ПВХ), полікарбонат (ПК), поліетилентерефталат (ПЕТФ), поліфеніленоксид (ПФО), поліімід (ПІ) або інші в'язкопружні матеріали.

Зразки: Для випробувань застосовують зразки у вигляді лопаток згідно з ГОСТ 11262-80 типу 2 або 3. Для досліджень плівкових матеріалів застосовують зразки згідно з ГОСТ 14236-81 у вигляді смужок шириною 10-25 мм і довжиною не менше ніж 150 мм. Перед дослідженнями вимірюють товщину й ширину зразків і обчислюють площу поперечного перерізу.

Методика проведення випробувань: (див. "Опис, будова та порядок роботи з обладнанням для вимірювання повзучості та релаксації напружень в'язкопружних матеріалів", наведений вище).

Перед проведенням дослідів зразки кондиціонують згідно ГОСТ 12423-66. Підготовлені зразки закріплюють в затискувачах машини та витримують 30 хв.

для прогріву при температурі випробування. Записують показання вимірювачів деформації у ненавантаженому стані, потім проводять навантаження постійним зусиллям P_K й вимірюють видовження при таких значеннях часу спостережень: 5 с, 15 с, 1 хв, 5 хв, 15 хв, 1 год, 6 год, 24 год. і так далі через кожну добу після початку експеримента.

Результати випробувань заносять до табл. 2.1.1.

Таблиця 2.1.1. Видовження зразків $\Delta l(t)$ мм, при випробуваннях на повзучість при дії різних температур та навантажень

Час	Навантаження P_K, H	Температури			
		$T_0 = 20^0 C$	$T_1 = \dots^0 C$	$T_2 = \dots^0 C$	$T_3 = \dots^0 C$
5 с					

(Далі при інших значеннях часу спостережень)

В результаті отримують серію кривих повзучості при різних навантаженнях та температурах. Для кожного досліді використовують нові зразки.

Обробка результатів вимірювань:

1. Визначають відносні деформації $\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_0} \cdot 100\%$

та відповідні напруження $\sigma_K = P_K / F_0$,

де l_0 та F_0 - початкова робоча довжина (відстань між затискувачами випробувальної машини) та початкова площа поперечного перерізу зразка.

Результати розрахунків заносять до табл. 2.1.2.

Таблиця 2.1.2. Відносні деформації зразків $\varepsilon(t)$, % при випробуваннях на повзучість при дії різних температур і напружень.

Час	Напруження $\sigma_K, \text{МПа}$	Температури			
		$T_0 = 20^0 \text{C}$	$T_1 = \dots^0 \text{C}$	$T_2 = \dots^0 \text{C}$	$T_3 = \dots^0 \text{C}$
5 с					

(Далі при інших значеннях часу спостережень)

2. Визначають значення функції повзучості (податливості) матеріалу:

$$I(t) = \varepsilon(t) / \sigma_K,$$

де $\varepsilon(t)$ - відносне видовження з табл. 2.1.2 у відносних одиницях.

Результати розрахунків записують в табл. 2.1.3. Для зручності запису кожне значення $I(t)$ домножають на 10^4 .

Таблиця 2.1.3. Значення функції повзучості (податливість) матеріалу $I \cdot 10^4, \text{МПа}^{-1}$ при випробуваннях на повзучість при дії різних температур та напружень.

Час	Напруження $\sigma_K, \text{МПа}$	Температури			
		$T_0 = 20^0 \text{C}$	$T_1 = \dots^0 \text{C}$	$T_2 = \dots^0 \text{C}$	$T_3 = \dots^0 \text{C}$
5 с					

(Далі при інших значеннях часу спостережень)

3. На міліметровому папері будують криві повзучості в координатах $I(t)-t$, вказуючи для кожної кривої температуру випробувань T та діюче напруження σ_K (дані беруть з табл. 2.1.3)

Типові криві повзучості показані на рис. 2.1.1.

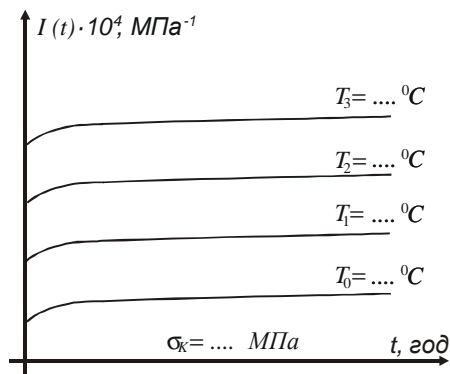


Рис. 2.1.1. Криві повзучості при різних температурах T та фіксованому напруженні σ_K .

Визначають області лінійності в'язкопружних властивостей матеріалів при різних температурах.

Для цього будуємо ізохронні криві повзучості в координатах $\sigma_K - \varepsilon$ при фіксованому часі вимірювання, використовуючи дані табл. 2.1.2. Типові ізохронні криві показані на рис. 2.1.2. Такі криві будують для 4-5 значень часів спостережень (наприклад, для 5 с, 1 хв, 1 год, 24 год).

Користуючись ізохронними кривими, визначаємо границю лінійної в'язкопружності матеріалу σ_L , як напруження, при якому не порушується лінійний зв'язок між σ та ε . Якщо явно виражена лінійна ділянка на ізохронній кривій відсутня, за границю лінійної в'язкопружності приймають напруження, при якому відхилення від лінійності не перевищує заданого значення (наприклад, 10%).

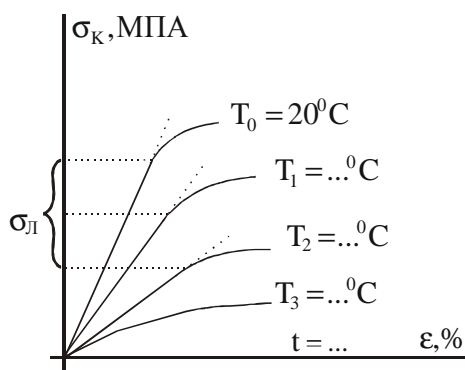


Рис. 2.1.2. Визначення областей лінійності в'язко-пружних властивостей матеріалів за допомогою ізохронних кривих при різних температурах T .

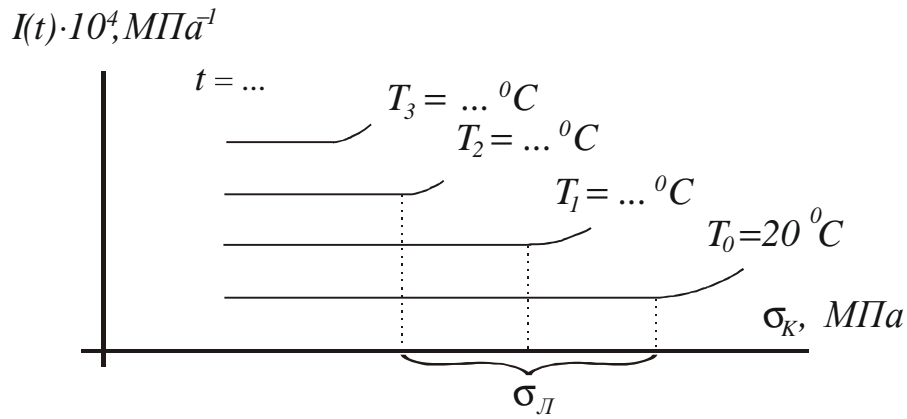


Рис. 2.1.3. Визначення областей лінійності в'язко-пружних властивостей матеріалів за залежностями $I - \sigma_K$ при фіксованому часі спостережень t та різних температурах T .

Інший спосіб визначення границі лінійної в'язкопружності σ_L - це побудова залежностей між податливістю матеріалу I та напруженням σ_K при фіксованому значенні часу спостережень (дані табл. 2.1.3). Типові залежності $I - \sigma_K$ показані на рис. 2.1.3. Відхилення I від постійного значення свідчить про порушення лінійності в'язкопружних властивостей матеріалу. Такі залежності будуються також для 4-5 значень часів спостережень.

4. Будуємо залежності границі лінійної в'язкопружності матеріалу від температури випробувань T при різних значеннях часів спостережень t (рис. 2.1.4).

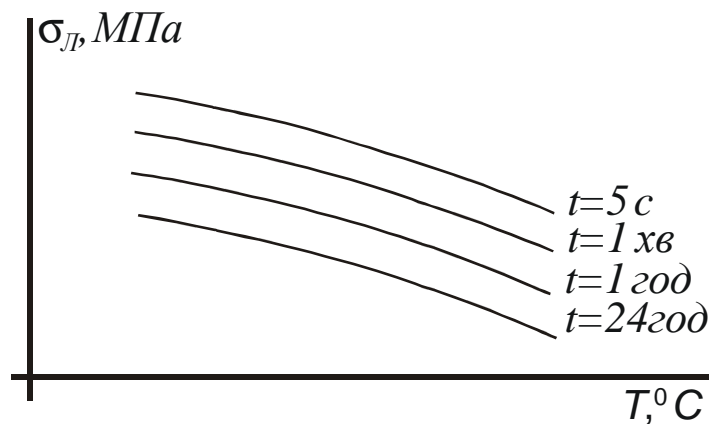


Рис. 2.1.4. Залежності межі лінійні в'язкопружності σ_L від температури випробувань T .

Завдання:

- одержати криві повзучості при різних температурах та напруженнях;
- пояснити залежності деформації повзучості від температури та напруження;
- знайти границю лінійної в'язкопружності при різних значеннях температури та часу спостережень;
- пояснити наявність областей лінійності в'язкопружних властивостей та їх залежність від температури.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.2

Експериментальне визначення коефіцієнтів рівнянь температурно-часової аналогії. Побудова узагальнених кривих повзучості.

Мета роботи: одержати експериментальні криві повзучості полімерних матеріалів при різних температурах;
визначити декілька значень температурної функції зсуву a_T та розрахувати коефіцієнти рівняння Вільямса-Ландела-Феррі;
побудувати узагальнену криву повзучості полімерного матеріалу.

Прилади та обладнання: аналогічні описаним у лабораторній роботі №2.1.

Досліджувані матеріали: ПЕ, ПД, ПВХ, ПК, ПЕТФ, ПФО, ГП або інші матеріали.

Зразки, методики проведення випробувань та обробка результатів:

аналогічні описаним у лабораторній роботі № 2.1.

Значення функцій повзучості $I(t, T)$, обчислені при кожному значенні часу та температури, усереднюємо. При цьому враховуємо тільки ті значення I , які одержані при напруженнях $\sigma_K \leq \sigma_L$

Усі значення часу спостережень переводимо в секунди і логарифмуємо. Результати випробувань та розрахунків заносимо до табл. 2.2.1.

Таблиця 2.2.1. Усереднені значення функції повзучості (податливість) матеріалу $I \cdot 10^4$ (МПа⁻¹) при випробуваннях на повзучість при дії різних температур.

Час	$\ln t$	Температури			
		$T_0 = 20^0 C$	$T_1 = \dots^0 C$	$T_2 = \dots^0 C$	$T_3 = \dots^0 C$
5 сек	1,61				
15 сек	2,71				
1 хв	4,09				
15 хв	6,80				

(Далі при інших значеннях часу спостережень)

Визначення температурної функції зсуву.

На міліметровому папері будуємо криві повзучості у напівлогарифмічних координатах $I(t)-\ln t$ (рис. 2.2.1).

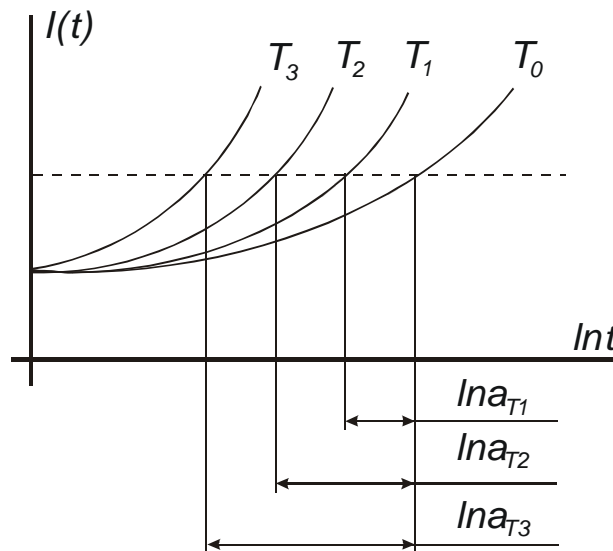


Рис. 2.2.1. Криві повзучості, побудовані у напівлогарифмічних координатах та схема визначення логарифмів функції a_T .

За температуру зведення приймаємо $T_0 = 20^0 C$.

Вимірюємо, як показано на рис. 2.2.1, середні відстані по горизонталі між зазначеними кривими, побудованими для температур T_1, T_2, T_3 , та кривою для

температури T_0 . При цьому одержуємо чотири значення логарифмів температурної функції зсуву:

$$\text{при } T = T_0 \quad \ln a_T = 0; \quad \text{при } T = T_1 \quad \ln a_T = \ln a_{T1};$$

$$\text{при } T = T_2 \quad \ln a_T = \ln a_{T2}$$

$$\text{та при } T = T_3 \quad \ln a_T = \ln a_{T3}.$$

За цими даними будуюмо графік залежності $\ln a_T$ від температури (рис.2.2.2). Крива, що апроксимує залежність, повинна бути гладка та опукла.

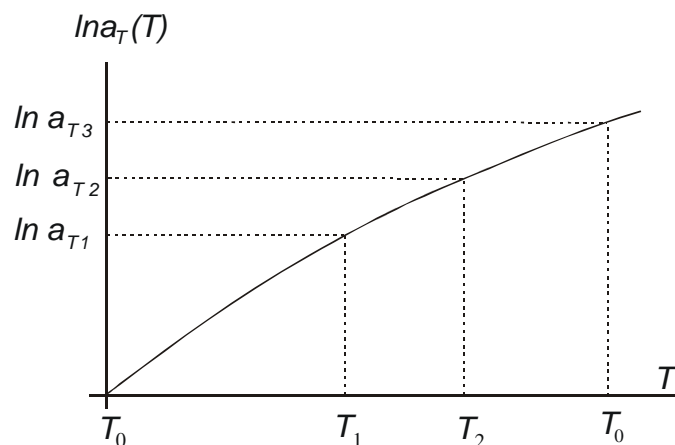


Рис. 2.2.2. Залежність логарифму функції α_T від температури.

Розрахунок коефіцієнтів рівняння Вільямса-Ландела-Феррі (ВЛФ).

Використовуємо значення $\ln a_T$, виміряні для будь-яких двох температур T_i та T_k (вони не обов'язково дорівнюють T_1, T_2 ; або T_3).

З урахуванням рівняння ВЛФ (30) отримаємо систему двох рівнянь

$$\ln a_T |_{T=T_i} = \frac{a(T_i - T_0)}{b + (T_i - T_0)},$$

$$\ln a_T |_{T=T_k} = \frac{a(T_k - T_0)}{b + (T_k - T_0)}.$$

Розв'язавши її, визначаємо значення коефіцієнтів a та b рівняння ВЛФ.

Побудова узагальненої кривої повзучості.

Визначивши коефіцієнти a та b рівняння ВЛФ, виконаємо побудову

узагальненої кривої повзучості, зміщуючи по горизонталі точку кривих повзучості для температур T_1, T_2, T_3 до кривої, що відповідає температурі T_0 .

Величину зсуву обчислюємо за формулою

$$\ln t |_{T=T_0} - \ln t |_{T=T_j} = \frac{a(T_j - T_0)}{b + (T_j - T_0)}, \quad (j = 1, 2, 3)$$

Принцип побудови узагальненої кривої показано на рис. 2.2.3.

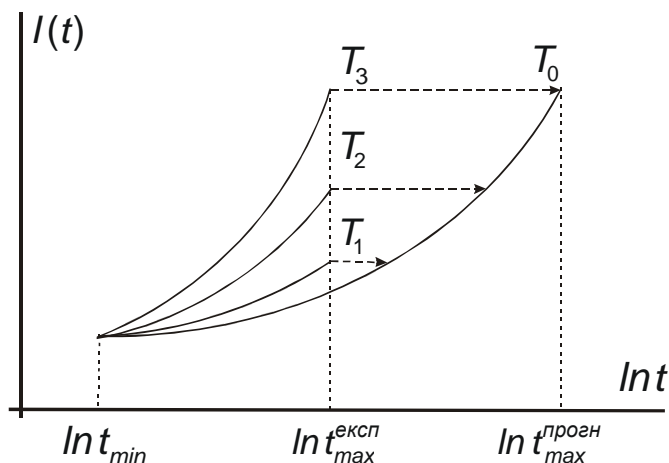


Рис. 2.2.3. Схема побудови узагальненої кривої повзучості методом горизонтального зсуву кривих повзучості, одержаних за результатами короткочасних експериментів.

Введено такі позначення:

t_{\min} - мінімальний час спостереження (в даній роботі 5 секунд);

$t_{\min}^{\text{експ}}$ - максимальний час спостережень при виконанні експерименту,

$t_{\max}^{\text{прогн}}$ - максимальний час, до якого можливо виконувати прогноз процесу

повзучості.

Завдання:

- визначити, чи є досліджений полімер термореологічно простим;
- визначити максимальний час, для якого можна виконувати прогноз повзучості при нормальній температурі;
- розрахувати величини відносної деформації $\varepsilon(t)$ для декількох

значень часу $t_{\max}^{\text{експ}} < t \leq t_{\max}^{\text{прогн}}$ при дії постійного напруження $\sigma_K \leq \sigma_L$.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.3

Визначення коефіцієнтів рівняння повзучості за узагальненою моделлю Кельвіна-Фойгта

Мета роботи:

одержати експериментальну криву повзучості при кімнатній температурі;
розрахувати коефіцієнти рівняння повзучості, використовуючи моделі з різним
числом елементів;
оцінити точність апроксимації порівняно з експериментальними результатами.

Прилади та обладнання: аналогічні описаним у лабораторній роботі №2.1.

Досліджувані матеріали: ПЕ, ПП, ПВХ. ПК, ПЕТФ, ПФО, ПІ або інші
в'язкопружні матеріали.

Зразки, методика проведення випробувань та обробка результатів:

аналогічні описаним у лабораторній роботі №2.1.

Експериментальну залежність $\varepsilon = \varepsilon(t)$ або $I = I(t) = \varepsilon(t) / \sigma_K$, отриману
при постійних напруженні $\sigma = \sigma_K$ та температурі $T=(20\pm 3)^{\circ}\text{C}$, опишемо
рівнянням, що відповідає узагальненій моделі Кельвіна-Фойгта (15)

$$I(t) = I_0 + \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \tau_i)], \quad (2.3.1)$$

де $I_0; I_1, \dots, I_i, \dots, I_n; \tau_1, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n$ - коефіцієнти, які необхідно знайти.

Позначення часу пружної післядії λ_i , змінено на τ_i .

Визначення коефіцієнтів рівняння повзучості при n=1.

Для моделі Кельвіна-Фойгта (рис. 2.3.1а), яка складається з одного
пружного та одного в'язкого елементів при n= 1

$$\begin{aligned} I(t) &= I_0 + I_1 [1 - \exp(-t / \tau_1)] \text{ або} \\ I(t) &= I_0 + I_{\infty} [1 - \exp(-t / \tau_1)]. \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

Для часу $t = \tau_1$ з (2.3.2) маємо:

$$I|_{t=\tau_1} = I_0 + I_\infty [1 - e^{-1}] = I_0 + 0,632 \cdot I_\infty.$$

З урахуванням цієї умови коефіцієнти I_0 , I_∞ та τ_1 визначимо графічно за кривою повзучості (рис. 2.3.1а).

Коефіцієнт I_0 відповідає пружній деформації при $t=0$. Коефіцієнт I_∞ , - це відстань від точки перетину кривої повзучості з віссю ординат при $t=0$ до асимптоти кривої повзучості. Схема графічного визначення τ_1 зрозуміла з рисунка.

Визначення коефіцієнтів рівняння повзучості при $n \neq 1$

У цьому випадку приймаємо два припущення, які підтверджені практикою.

Вважаємо, що:

$$1. I_1 = I_2 = \dots = I_i = \dots = I_n, \quad (2.3.3)$$

$$2. \tau_1 \ll \tau_2 \ll \dots \ll \tau_i \ll \dots \ll \tau_n. \quad (2.3.4)$$

Приведемо (2.3.1) до більш зручного вигляду:

$$I(t) = I_0 + \frac{I_\infty}{n} \left[n - \sum_{i=1}^n \exp(-t / \tau_i) \right] \quad (2.3.5)$$

При цьому враховано припущення (2.3.3), тобто

$$\sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \tau_i)] = I_i \sum_{i=1}^n [1 - \exp(-t / \tau_i)] = \frac{I_\infty}{n} \left[n - \sum_{i=1}^n \exp(-t / \tau_i) \right].$$

При $n=2$ $I_1 = I_2 = I_\infty / 2$.

В цьому випадку з (2.3.5) з урахуванням припущення (2.3.4) витікає:

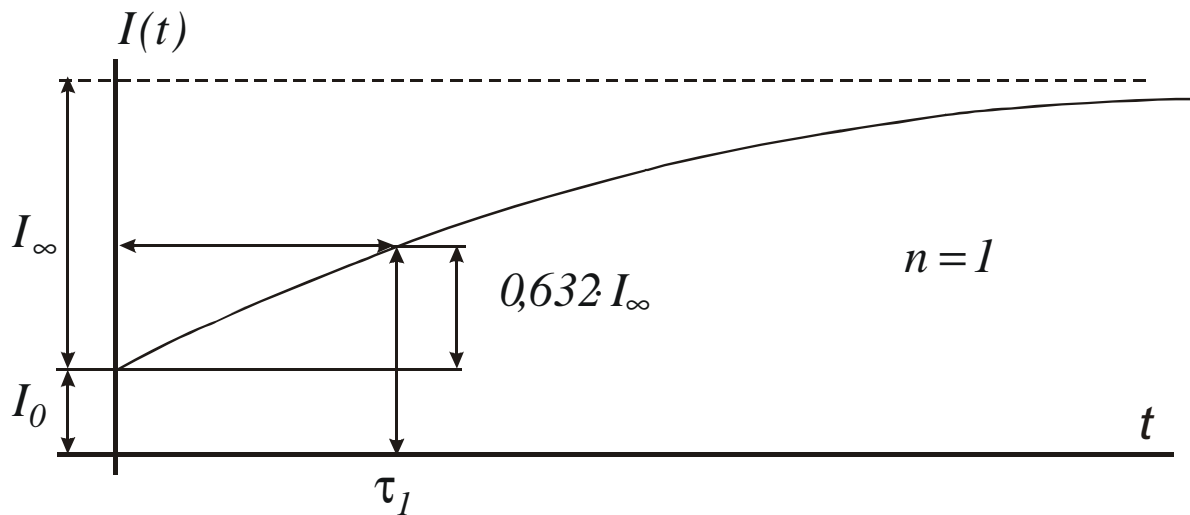
$$\left. \begin{aligned} I|_{t=\tau_1} &= I_0 + 0,317 \cdot I_\infty \\ I|_{t=\tau_2} &= I_0 + 0,816 \cdot I_\infty \end{aligned} \right\}$$

При виведенні цих співвідношень враховано, що:

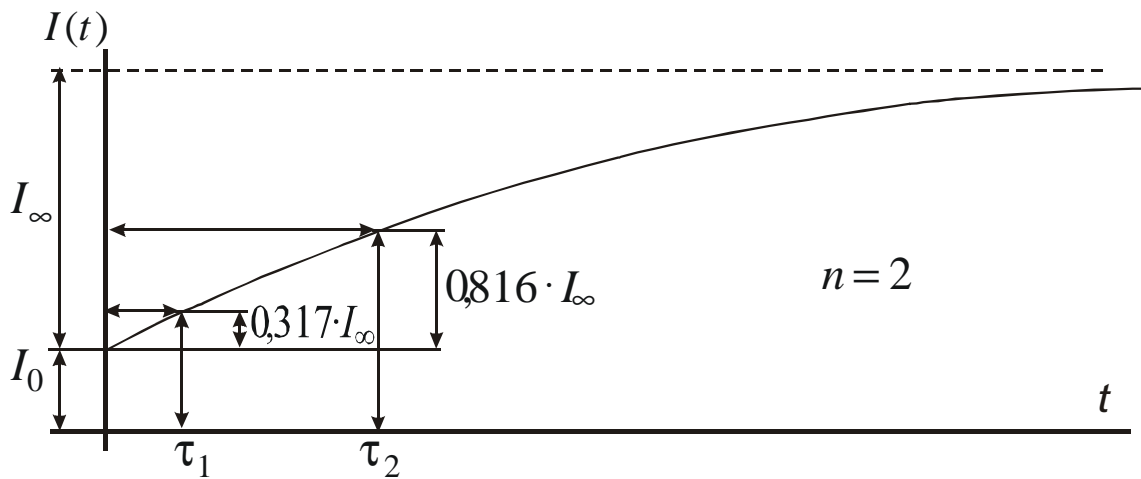
$$\exp\left(-\frac{\tau_i}{\tau_{i+1}}\right) \approx 1, \quad a \quad \exp\left(-\frac{\tau_i}{\tau_{i+1}}\right) \approx 0.$$

Схема графічного визначення τ_1 та τ_2 показана на рис. 2.3.1б.

При $n=3$ $I_1 = I_2 = I_3 = I_\infty / 3$,



a)



б)

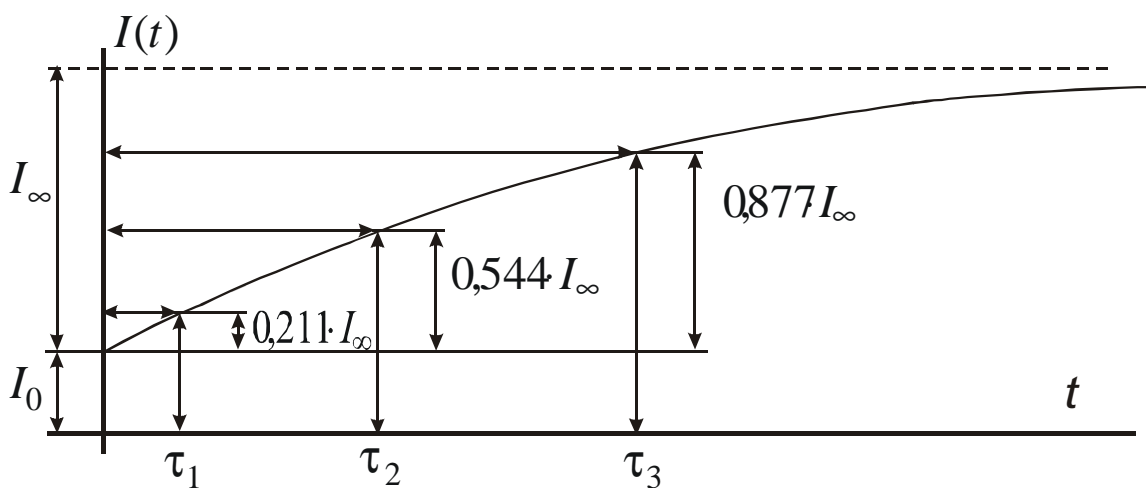


Рис 2.3.1. Схеми визначення коефіцієнтів рівняння повзучості, що відповідає узагальненій моделі Кельвіна-Фойгта.

$$\left. \begin{aligned} I|_{t=\tau_1} &= I_0 + 0,211 \cdot I_\infty \\ I|_{t=\tau_2} &= I_0 + 0,544 \cdot I_\infty \\ I|_{t=\tau_3} &= I_0 + 0,877 \cdot I_\infty \end{aligned} \right\}$$

Схема графічного визначення τ_1 , τ_2 та τ_3 показана на рис. 2.3.1в.

Отримані значення коефіцієнтів рівняння повзучості заносимо до табл. 2.3.1.

Таблиця 2.3.1. Значення коефіцієнтів рівняння повзучості (2.3.1) для моделей Кельвіна-Фойгта з різною кількістю елементів.

Кількість елементів n	Коефіцієнти $I_i \cdot 10^4, \text{Mna}^{-1}$					Часи пружної післядії τ_i, c		
	I_0	I_∞	I_1	I_2	I_3	τ_1	τ_2	τ_3
1				—	—		—	—
2					—			—
3								

Завдання:

- використовуючи рівняння повзучості (2.3.1) та знайдені значення коефіцієнтів I_i , τ_i , розрахувати деформації зразків для різних часів дії навантаження;
- порівняти експериментальні та розрахункові дані для моделей з 1, 2 та 3-ма елементами;
- визначити максимальне число членів ряду експоненціального рівняння (2.3.1) для задовільного опису кривих повзучості.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.4

Розрахунок параметрів інтегральних рівнянь в'язкопружності.

Мета роботи: одержати експериментальну криву повзучості при кімнатній температурі;

визначити параметри ядра інтегрального рівняння повзучості (за М.А Колтуновим);

оцінити точність апроксимації порівняно з експериментальними результатами.

Прилади та обладнання: випробувальна установка для вимірювання повзучості плівкових та листових полімерних матеріалів або універсальна випробувальна машина TIRATEST-2151; штангенциркуль з ціною поділки 0.05 мм; товщиномір з ціною поділки 0.001 або 0.002 мм.

Досліджувані матеріали: (лаб. роб. 2.3)

Зразки, методики проведення випробувань та обробка результатів:

Для випробувань застосовують зразки у вигляді двосторонніх лопаток згідно з ГОСТ 11262-80 типу 2 або 3. Для досліджень плівкових матеріалів застосовують зразки згідно з ГОСТ 14236-81 у вигляді смужок шириною 10-25 мм і довжиною не менше ніж 150 мм. Перед дослідженнями вимірюють товщину й ширину зразків і обчислюють площу поперечного перерізу.

Методика визначення модулів пружності та параметрів функції впливу .
Для визначення модулів та функції впливу (27), (28) використовуємо графіки, які розміщені у монографії [1]. Модуль пружності та коефіцієнти ядра повзучості визначають шляхом суміщення експериментальних кривих

податливості $\bar{\varepsilon}_e(t) \equiv \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_K}$, та теоретичних кривих $\varepsilon_T(t) = 1 + \int_0^t K(t-\tau)d\tau$,

побудованих у логарифмічних координатах.

З рівняння повзучості $\varepsilon(t) = \frac{\sigma_K}{E} \left[1 + \int_0^t K(t-s) ds \right]$, для одновісного

стану або $\varepsilon(t) \frac{E}{\sigma_K} = 1 + \int_0^t K(s) ds$ витікає, що $\lg E + \lg \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_K} = \lg \left[1 + \int_0^t K(s) ds \right]$.

Відстань між подібними кривими $\lg \bar{\varepsilon}_e$ та $\lg \bar{\varepsilon}_T$. в цих координатах дорівнює $\lg E$ для будь-яких I та $K(t)$, тобто

$$\lg E = \lg \left[1 + \int_0^t K(s) ds \right] - \lg \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_K}, \quad \text{або} \quad E = \frac{1 + \int_0^t K(s) ds}{\varepsilon(t) / \sigma_K}.$$

Якщо крива $\bar{\varepsilon}_e(t)$ не збігається з подібною їй кривою $\bar{\varepsilon}_T(t)$, то їх суміщення здійснюємо горизонтальним та вертикальним зсувами (рис. 2.4.1). Вертикальне зміщення дорівнює $\lg E$. Горизонтальне еквівалентне лінійному перетворенню координат t .

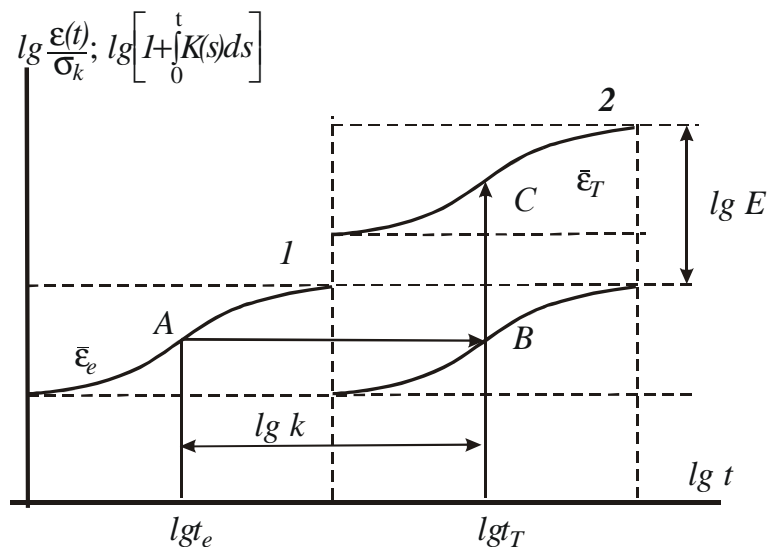


Рис 2.4.1 Схема визначення параметрів ядра рівняння повзучості.

Нехай на рис. 2.4.1 крива 1 - експериментальна крива $\bar{\varepsilon}_e(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_K}$,

крива 2 – подібна до неї теоретична $\bar{\varepsilon}(t) = 1 + \int_0^t K(s) ds$ з конкретними

числовими значеннями параметрів α_T, β_T, A_T .

Для зміщення кривих 1 та 2 потрібно спочатку змістити криву 1 праворуч на величину $AB = \lg k = \lg t_T - \lg t_0$. Іншими словами, для переносу будь-якої точки A кривої 1 з положення A в положення B у звичайних координатах

достатньо в рівнянні $\varepsilon_T(t) = 1 + \int_0^t K(s, \alpha_T, \beta_T, A_T) ds$, зробити заміну $t_T = kt_0$.

Експериментальні параметри α_e, β_e та A_e знаходять за формулами

$$\alpha_e = k\alpha_T; \quad \beta_e = k\beta_T, \quad A_e = k^{\alpha_T} A_T,$$

$$\partial e \quad k = \frac{t_T}{t_e}.$$

Завдання:

- побудувати експериментальну криву повзучості матеріалу;
- методом суміщень підібрати параметри ядер інтегрального рівняння повзучості;
- оцінити розходження експериментальних даних та результатів апроксимації.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.5

Побудова кривих релаксації напружень. Розрахунок коефіцієнтів рівняння релаксації за узагальненою моделлю Максвелла

Мета роботи: експериментально одержати криву релаксації напружень при одновісному деформуванні зразка з в'язкопружного матеріалу;

розрахувати коефіцієнт рівняння релаксації напружень, що відповідає узагальненій моделі Максвелла;

оцінити точність апроксимації порівняно з експериментальними даними.

Прилади та обладнання: випробувальна машина TIRATEST-2151;

інструмент для вимірювання розмірів зразків, що випробовуються; секундомір.

Досліджувані матеріали: ПЕ, ПП, ПВХ або інші в'язкопружні матеріали.

Зразки: для випробовувань застосовують зразки у вигляді лопаток згідно з ГОСТ 11262-80 типу 2 або 3. Для досліджень плівкових матеріалів застосовують зразки згідно з ГОСТ 14236-81 у вигляді смужок шириною 10-25 мм і довжиною не менше ніж 150 мм. Перед дослідженням вимірюють товщину й ширину зразків і обчислюють площу поперечного перерізу.

Методика проведення випробувань: (див. п. 2.3 "Вимірювання релаксації напружень за допомогою універсальної випробувальної машини TIRATEST-2151").

Перед проведенням дослідів зразки кондиціонують згідно з ГОСТ 12423-66. Підготовлені зразки закріплюють у затискувачах випробувальної машини і швидко розтягують (або стискають) до заданого значення деформації ϵ_K .

Записують початкове (максимальне) значення зусилля в зразку. Залишивши зразок у деформованому стані при $\epsilon = const$, записують значення зусиль при таких значеннях часу спостережень: 5 с, 15 с, 30 с, 1 хв, 5 хв, 15 хв, 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв і так далі через кожні 30 хв після початку експерименту.

Результати заносять до табл. 2.5.1.

Таблиця 2.5.1. Результати вимірювання та розрахунків релаксації напружень в зразку з в'язкопружного матеріалу при одновісній деформації

Час	Зусилля в зразку $P(t), Н$	Напруження $\sigma(t), МПа$	Модулі, МПа		Похибка $\Delta, \%$
			$E(t)$	$E^P(t)$	
0					
5с					
15с					
30с					

(Далі при інших значеннях часу спостережень)

В таблицю записують такі дані:

- напруження $\sigma(t) = P(t) / F_0$;

- модуль релаксації (експериментальні дані) $E(t) = \sigma(t) / \varepsilon_K$,

де F_0 - площа поперечного перерізу зразка;

$\varepsilon_K = \Delta l / l_0$ - задана відносна деформація зразка;

Δl - видовження зразка; l_0 - робоча довжина зразка.

Найбільш складним є визначення початкового зусилля в зразку при $t = 0$.

Це зусилля можна з достатнім ступенем точності визначити за діаграмою деформування, записаною при тій же швидкості деформування, як при випробуванні на релаксацію. Спосіб запису діаграми деформування описано в [3].

Обробка результатів

Для апроксимації кривої релаксації напружень $\sigma = \sigma(t)$ використовуємо рівняння, яке відповідає узагальненій моделі Максвелла

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_K} = \sum_{i=1}^n E_i \exp(-t / \tau_i). \quad (2.5.1)$$

Визначення коефіцієнтів E_i та τ_i (модулі та часи релаксації) здійснюємо способом "поетапного виділення експонент". В основі його лежить припущення, що величини сусідніх за номером часів релаксації багатократно відрізняються одна від одної, тобто

$$\tau_i \ll \tau_{i-1}. \quad (2.5.2)$$

Процес виділення експонент можна розділити на такі етапи:

1. На міліметровому папері будуємо криву релаксації в координатах " $\ln E(t)-t$ ". Екстраполюємо лінійну ділянку кривої $\ln E(t)-t$ до перетину з віссю ординат (рис. 2.5.1). Записуємо рівняння цієї прямої у вигляді

$$\varphi_n(t) = E_n \exp(-t / \tau_n). \quad (2.5.3)$$

Визначаємо $\ln E_n$ за точкою перетину прямої з віссю ординат, а

$E_n = \exp(\ln E_n)$. Час релаксації визначається графічно (рис. 2.5.1) після знаходження $\ln(E_n / 2,718)$ та часу τ_n , що йому відповідає. Вказаний час можна знайти з рівняння

$$\ln E(t_n) = \ln[E_n \exp(-t_n / \tau_n)],$$

де t_n - довільні значення часу в межах лінійної ділянки кривої релаксації, $E(t_n)$ - модуль, що відповідає цьому часу.

2. Віднімаємо з $E(t)$ значення $\varphi_n(t)$, розраховані за виразом (2.5.3), і на міліметровому папері будуємо залежність $\ln[E(t) - \varphi_n(t)]$ від часу (рис.2.5.2). Екстраполюємо лінійну ділянку до перетину з віссю ординат і записуємо рівняння цієї прямої

$$\varphi_{n-1}(t) = E_{n-1} \exp(-t / \tau_{n-1}). \quad (2.5.4)$$

Визначаємо $E(t_{n-1})$ за точкою перетину прямої з віссю ординат. Час релаксації τ_{n-1} визначається графічно (рис. 2.5.3) або з рівняння

$$\ln E(t_{n-1}) = \ln[E_{n-1} \exp(-t_{n-1} / \tau_{n-1})].$$

3. Будуємо залежність $\ln[E(t) - \varphi_n(t) - \varphi_{n-1}(t)]$ від часу і повторюємо процес.

Обчислення припиняємо, якщо на якомусь кроці $n-k$ залежність $\ln[E(t) - \varphi_n(t) - \varphi_{n-1}(t) - \dots - \varphi_{n-k}(t)]$ від часу практично укладається на пряму лінію (рис. 2.5.3).

Перейменовуємо модулі та часи релаксації таким чином:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{n-k}; & E_2 &= E_{n-k+1}; \\ \tau_1 &= \tau_{n-k}; & \tau_2 &= \tau_{n-k+1}; \end{aligned}$$

За формулою (2.5.1) обчислюємо значення $E(t) = E^P(t)$ (розрахункове значення) і заносимо до табл 2.5.1.

Після цього оцінюємо точність апроксимації, розраховуючи відносні похибки

$$\Delta = \frac{E - E^P}{E} \cdot 100\%$$

для кожного часу спостережень.

Завдання:

- розрахувати коефіцієнти для узагальненої моделі Максвелла;
- встановити мінімально необхідне число елементів моделі $n = k + 1$;
- за формулою (2.5.1) розрахувати модулі релаксації для кожного часу спостережень і встановити похибку апроксимації;
- розрахувати на скільки відсотків знизиться напруження в зразку за 1 хв, 1 год., 1 добу після навантаження.

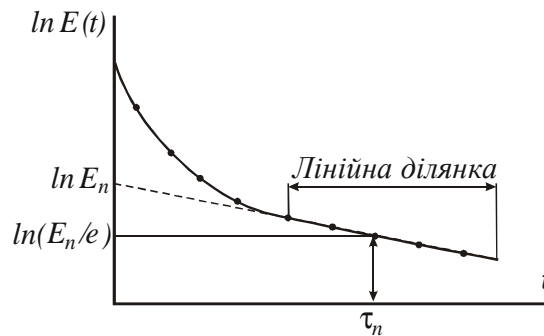


Рис 2.5.1. Схема визначення E_n та τ_n

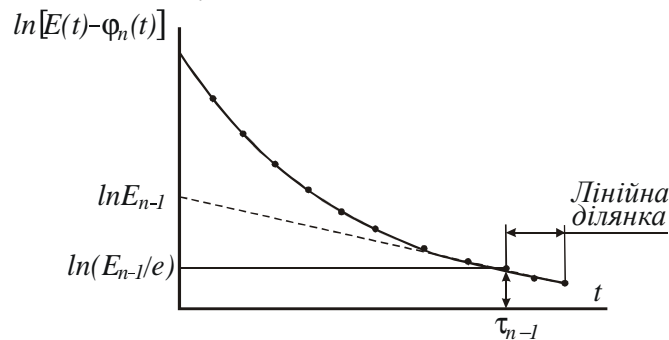


Рис 2.5.2. Схема визначення E_{n-1} та τ_{n-1}

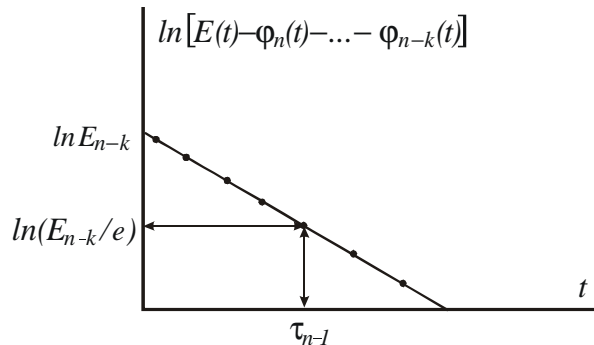


Рис. 2.5.3. Схема визначення E_{n-k} та τ_{n-k} (останній крок)

КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

1. Що таке в'язкопружні деформації?
2. Охарактеризуйте криву повзучості полімеру. З яких ділянок вона складається?
3. Від чого залежить деформації повзучості полімерних матеріалів?
4. Яка природа оборотних та необоротних деформацій?
5. Що таке податливість матеріалу?
6. В чому полягають принципи Больцмана та як вони використовуються при складанні спадкових рівнянь?
7. Які відомі моделі для опису в'язкопружних властивостей полімерів?
8. У чому полягає принцип температурно-часової аналогії?
9. Що таке терморелогічно простий матеріал?
10. Що таке зведений час?
11. Описати методику побудови кривих повзучості.
12. Що таке область лінійної повзучості та як вона визначається?
13. Що таке ізохронна крива повзучості?
14. Як побудувати узагальнені криві повзучості?
15. Що таке температура зведення?
16. Описати один із способів визначення параметрів рівняння повзучості.
17. Як експериментально визначити функції повзучості та релаксації матеріалів?
18. Як записуються рівняння, що відповідають моделі Кельвіна-Фойгта (постійно діюче навантаження)?
19. Як записується рівняння, що відповідає моделі Максвелла (постійно діюча деформація)?
20. Як записується рівняння, що відповідає моделі Бюргерса?
21. Записати інтегральні рівняння, що відповідають процесам повзучості та релаксації напружень на основі гіпотез Больцмана.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. – М: Высшая школа, 1976. –276с.
2. Колтунов М.А., Майборода В.П., Зубганинов В.Г. Прочностные расчеты изделий из полимерных материалов. – М: Машиностроение. 1983. – 239 с.
3. Шидловский М.С., Шпак Д.Ю. Практикум з лабораторних робіт з дисципліни „Нові матеріали”. Частина I „Міцність і деформування полімерних та композиційних матеріалів при короткочасному навантаженні”. – К.: НТУУ „КПІ”. 1999. – 37 с.
4. Уржумцев Ю.С., Максимов Р.Ф. Прогностика деформативности полимерных материалов. – Рига: Знание. 1975. – 416 с.
5. Огибалов П.М., Ломакин В.А., Кишкин Б.П. Механика полимеров. – М.: Изд-во МГУ. 1975. – 528 с.
6. Норисава И. Прочность полимерных материалов. – М.: Химия.1987. –400с.

ЗМІСТ

Загальні положення.....	3
Умовні позначення.....	5
1 Основні відомості про вязкопружну поведінку полімерних і композиційних матеріалів при довгочасному навантаженні в робочих діапазонах температур.....	8
1.1. Складові частини загальної деформації.....	8
1.2. Механічні моделі в'язкопружного тіла.....	9
1.3. Основні рівняння спадкової лінійної в'язкопружності.....	14
1.4. Принцип температурно-часової аналогії.....	17
2. Опис, будова та порядок роботи з обладнанням для вимірювання повзучості та релаксації напружень в'язкопружних матеріалів.....	19
2.1. Випробувальна установка для вимірювання повзучості плівкових та листових полімерних матеріалів.....	19
2.2. Вимірювання деформацій повзучості за допомогою універсальної випробувальної машини Т1RATEST-2151.....	20
2.3. Вимірювання релаксації напружень за допомогою універсальної випробувальної машини Т1КАTEST-2151.....	22
<u>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.1.</u> Побудова кривих повзучості. Визначення областей лінійності в'язкопружних властивостей матеріалів при різних температурах.....	23
<u>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.2.</u> Експериментальне визначення коефіцієнтів рівнянь температурно-часової аналогії. Побудова узагальнених кривих повзучості.....	29
<u>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.3.</u> Визначення коефіцієнтів рівняння повзучості за узагальненою моделлю Кельвіна-Фойгта.....	33
<u>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.4.</u> Розрахунок параметрів інтегральних рівнянь в'язкопружності.....	37
<u>ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2.5.</u> Побудова кривих релаксації напружень. Розрахунок коефіцієнтів рівняння релаксації за узагальненою моделлю Максвелла.....	39
Список літератури	43