

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Шидловський М.С., Бабенко А.Є., Боронко О.А.,
Заховайко О.П., Трубачев С.І.*

НОВІ МАТЕРІАЛИ: частина 2

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ
МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
КОНСТРУКЦІЙНИХ ПОЛІМЕРІВ ТА ПЛАСТМАС**

Затверджено Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів
спеціальності «Прикладна механіка»
спеціалізації «Динаміка і міцність машин»



Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2017

Шидловський М.С., Бабенко А.Є., Боронко О.О., Заховайко О.П., Трубачев С.І. Нові матеріали: частина 2 - Експериментальні методи досліджень механічних властивостей конструкційних полімерів та пластмас. [Текст]: Навчальний посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» спеціалізації «Динаміка і міцність машин» – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 265 с.

*Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 7 від 26.07.2017 р.)*

Навчальне видання

НОВІ МАТЕРІАЛИ: частина 2 - Експериментальні методи досліджень механічних властивостей конструкційних полімерів та пластмас

Навчальний посібник
для студентів спеціальності «Прикладна механіка»
спеціалізації «Динаміка і міцність машин»

Автори: *Шидловський Микола Сергійович*, канд. техн. наук, ст. наук. співр.
Бабенко Андрій Єлісейович, д-р. техн. наук, проф.
Боронко Олег Олександрович, д-р. техн. наук, проф.
Заховайко Олександр Панасович, канд. техн. наук, доц.
Трубачев Сергій Іванович, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний
Редактор

М. І. Бобир, д-р техн. наук, проф., член-кор. НАНУ.

Рецензенти:

В.О.Стрижало, д-р техн. наук, проф., член-кор. НАНУ.

С.О. Пискунов, д-р техн. наук, проф.

ЗМІСТ

	стор.
Умовні позначення	7
Передмова	9
ВСТУП. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ	11
1. Терміни та основні визначення	11
2. Основні цілі випробувань	13
3. Основні види випробувань та класифікація обладнання	15
4. Основні параметри засобів випробувань	21
5. Загальні вимоги до зразків та технології їх виготовлення	25
6. Загальний порядок проведення випробувань	32
7. Обробка та реєстрація результатів випробувань	35
1. ВИПРОБУВАННЯ ПРИ КОРОТКОЧАСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ	39
1.1. Обладнання для вимірювання характеристик міцності та пружності	39
1.1.1. Загальні вимоги до обладнання	39
1.1.2. Загальні відомості про випробувальну машину	46
1.1.3. Зовнішні вузли випробувальної машини	49
1.1.4. Керування режимами випробування	61
1.2. Випробування на міцність при розтягу, стиску та згині ...	74
1.2.1. Випробування матеріалів на розтяг. Побудова та обробка діаграм деформування. Характеристики міцності і пружності	74
1.2.2. Випробування матеріалів при стиску	84
1.2.3. Випробування матеріалів при згині	89
1.2.4. Визначення модулів пружності	96
1.3. Вимірювання твердості та ударної в'язкості	99
1.3.1. Вимірювання твердості за Шором	99
1.3.2. Вимірювання твердості методом вдавлення кульки	102
1.3.3. Вимірювання ударної в'язкості за Шарпі	107
1.3.4. Вимірювання ударної в'язкості за Ізодом	114

2. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКО-ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	120
2.1. В'язко-пружні характеристики полімерів	120
2.1.1. Складові деформації та основні рівняння лінійної в'язко-пружності	120
2.1.2. Принцип температурно-часової аналогії	130
2.2. Обладнання для вимірювання повзучості та релаксації напружень	132
2.2.1. Випробувальна установка для вимірювання повзучості полімерних матеріалів	132
2.2.2. Вимірювання в'язко-пружних характеристик за допомогою універсальної випробувальної машини	135
2.3. Побудова кривих повзучості та визначення областей лінійності в'язко-пружних властивостей	137
2.3.1. Стандартний метод визначення повзучості	137
2.3.2. Побудова та обробка кривих повзучості, визначення областей лінійності в'язко-пружних властивостей	146
2.4. Визначення коефіцієнтів рівнянь температурно-часової аналогії та побудова узагальнених кривих повзучості	150
2.4.1. Визначення температурної функції зсуву	150
2.4.2. Розрахунок коефіцієнтів рівняння ВЛФ та побудова узагальненої кривої повзучості	152
2.5. Визначення коефіцієнтів рівнянь повзучості	153
2.5.1. Узагальнена модель Кельвіна-Фойгта	153
2.5.2. Інтегральні рівняння в'язко-пружності	157
2.6. Побудова кривих та визначення коефіцієнтів рівняння релаксації напружень	159
2.6.1. Побудова кривих релаксації напружень	159
2.6.2. Визначення коефіцієнтів рівняння релаксації напружень	160

3. ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	164
3.1. Властивості полімерів при динамічних навантаженнях ..	164
3.2. Загальні вимоги до проведення вимірювань характеристик вібрацій	166
3.2.1. Особливості вимірювань характеристик вібрації	167
3.2.2. Вимоги до вимірної апаратури	171
3.2.3. Проведення вимірювань та оформлення результатів	174
3.3. Дослідження властивостей матеріалів та виробів динамічними методами	177
3.3.1. Стандартний метод коливань консольно закріпленого зразка	177
3.3.2. Стандартний метод крутильних коливань	184
3.4. Обладнання для вимірювання динамічних характеристик матеріалів	191
3.4.1. Електродинамічний вібраційний стенд ВЕДС-10	191
3.4.2. Установа для дослідження динамічних властивостей пластмас ..	194
3.4.3. Установа для проведення досліджень в розширеному діапазоні температур	196
3.4.4. Установа для досліджень при поздовжніх коливаннях зразків ...	198
3.4.5. Стенд для дослідження вібраційної міцності деталей та виробів ..	203
4. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	207
4.1. Засоби для випробувань в умовах підвищених та знижених температур	208
4.1.1. Камера для випробувань при підвищених температурах	208
4.1.2. Камера для випробувань при знижених температурах	210
4.1.3. Випробувальна установа для вимірювання температурних деформацій полімерних матеріалів	212
4.2. Прилади для вимірювання температурних деформацій ...	214
4.2.1. Інструментальні засоби вимірювання розмірів та деформацій зразків	214
4.2.2. Оптичний катетометр В-630	216
4.2.3. Мікроскоп відліковий типу МПБ-2	218

4.3. Метод визначення коефіцієнтів лінійного теплового розширення	220
4.4. Методи вимірювання теплової усадки пластмас	225
4.4.1. Метод вимірювання усадки термопластичних та термореактивних пластмас	225
4.4.2. Методи вимірювання теплової усадки листових виробів з полівінілхлориду	227
4.4.3. Методи визначення зміни довжини труб, виготовлених з термопластів, після прогріву	231
4.4.4. Метод визначення повздовжньої усадки профілів полівінілхлоридних	234
4.4.5. Метод визначення усадки поліетиленової термозбіжної плівки ...	235
4.5. Метод вимірювання температур розм'якшення за Віка ...	237
4.6. Методи визначення температур крихкості та морозостійкості	244
4.6.1. Метод визначення температури крихкості пластмас при ударі	244
4.6.2. Метод визначення температури крихкості пластмас при здавлюванні зразка, складеного петлею	247
4.6.3. Метод випробування ударним навантаженням на холоді виробів з полівінілхлориду	252
4.6.4. Метод визначення температурної границі крихкості гуми	253
4.6.5. Метод визначення морозостійкості гуми за еластичним відновленням після стиску	257
Література	260

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

t – час;

$\varepsilon(t)$ – повна деформація;

ε_{np} – миттєво пружна деформація;

$\varepsilon_{\text{еe}}(t)$ – високо-еластична деформація;

ε_{nl} – миттєво пластична деформація;

$\varepsilon_T(t)$ – в'язка незворотна деформація;

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

E_0 – миттєвий модуль пружності;

η – коефіцієнт в'язкості;

ε_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'язко-пружності матеріалу.

ПЕРЕДМОВА

Сучасний фахівець в області механіки повинен володіти основними методами випробувань матеріалів для визначення комплексу міцнісних, пружних і інших експлуатаційних характеристик. Це стосується не тільки інженерних працівників, які безпосередньо займаються експериментальними дослідженнями, але і всіх фахівців – механіків.

Корисно мати уявлення, як отримана та чи інша характеристика, наведена в технічному довіднику або іншій літературі. Бажано знати, наскільки можна довіряти даним, зазначеним у супровідній документації на матеріал. Ось лише частина питань, з якими доводиться стикатися сучасному інженеру.

Навіщо володіти основами експериментальних методів спеціалісту, який займається «чистими розрахунками»? Не викликає сумнівів, що для коректного проведення розрахунків на міцність і жорсткість необхідно якомога точніше знати механічні характеристики матеріалів, що застосовуються для виготовлення елементів даної конструкції.

В даний час більшість із застосовуваних матеріалів досліджені недостатньо повно. До наведених у технічній літературі даних необхідно ставитися дуже обережно. Наводяться, як правило, усереднені результати без зазначення конкретної марки матеріалу або вказуються лише діапазони характеристик. Тому кваліфікованим фахівцям в галузі міцності і надійності необхідно оволодіти сучасними методами експериментальних досліджень з урахуванням супутніх факторів.

Це видання призначене для студентів машинобудівних спеціальностей як навчальний посібник при вивченні дисципліни «Нові матеріали».

Основні питання, що розглянуті у посібнику:

- класифікація методів та випробувального обладнання;
- методи випробувань на міцність при різних режимах навантаження;
- обладнання та методи випробувань на повзучість і тривалу міцність;

- вимірювання динамічних характеристик при вібраційних впливах;
- вимірювання температурних характеристик, ударної міцності і твердості;
- способи обробки і реєстрації результатів експериментальних досліджень.

Частина результатів, наведених у посібнику, отримана в результаті досліджень, проведених в лабораторії механіки полімерних і композиційних матеріалів кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів КПІ ім. Ігоря Сікорського.

ВСТУП. ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ

1. Терміни та основні визначення

База вимірювання деформації – довжина відрізка прямої між двома точками (мітками), що нанесені на зразок або виділені базою тензометра, яка вимірюється перед прикладенням сили. Точки, як правило, наносяться на зразок так, щоб напрямком прямої, що їх з'єднує, збігався з напрямком дії зовнішньої сили або був перпендикулярним до нього.

Відносна похибка – характеристика ступеня відхилення середнього значення від шуканого значення.

Відносне видовження – відношення абсолютного видовження лінійного елемента до початкової його довжини.

Границя текучості – напруження, за якого зразок деформується без суттєвого збільшення навантаження.

Деформація – зміна форми або розмірів тіла (або якої-небудь його частини) без зміни маси.

Дійсне напруження – середнє напруження, яке визначається відношенням діючої сили до площі поперечного перерізу, що змінюється під час випробування.

Довірчий інтервал – значення границь, в яких при заданій ймовірності знаходиться значення показника, що визначається.

Залишкова деформація зразка – деформація, яка залишається після припинення дії на матеріал силових факторів, що її викликали, і деформація, що накопичилася за даний відрізок часу в результаті зміни стану матеріалу.

Зворотна деформація – деформація, яка зникає при припиненні дії на матеріал силових факторів, що її викликали.

Коефіцієнт варіації – характеристика розкиду результатів відносно середнього значення, визначеного за даними виконаних випробувань.

Механічні властивості – властивості, що характеризують при заданих зовнішніх умовах (температура, тиск і т.д.) здатність деформуватися (змінювати початкові розміри і форму) і руйнуватися під дією прикладених зовнішніх сил.

Механічні випробування – випробування для визначення механічних властивостей.

Напруження при розтягу – характеристика, що визначається відношенням діючої сили до вихідної площі поперечного зразка.

Повзучість – збільшення деформацій в зразку в часі при постійному напруженні.

Релаксація напруження – наслідок, що виражається в зміні у часі напруження деформованого матеріалу, загальна деформація якого зафіксована.

Руйнівне напруження – напруження, що відповідає моменту руйнування зразка.

Середнє значення показника – характеристика найбільш ймовірного значення показника, визначеного за результатами виконаних випробувань.

Час навантаження – час від початку прикладення навантаження до моменту відліку показника, що визначається.

Швидкість деформації – відношення деформації до часу, за який вона утворилася. Швидкість деформації виражається в s^{-1} .

Швидкість навантаження – відношення приросту навантаження, прикладеного до випробувального зразка, до відрізка часу, за який це підсилення досягнуте. За розтягу виражається в МПа/с.

Співставлення режимів випробувань за швидкістю навантаження допускається тільки для зразків однакового розміру.

2. Основні цілі випробувань

Вибір методів випробувань конструкційних пластмас залежить від цілей, що ставляться перед дослідником, і повинні бути сформульовані ще на етапі планування експериментів. Такими цілями можуть бути:

1. Визначення характеристик при розробці та виготовленні дослідних зразків нових матеріалів. За результатами випробувань оцінюється можливість застосування матеріалів в заданих умовах. У цьому випадку вибираються оптимальні технології виготовлення матеріалів та їхні рецептури (склади).

2. Випробування з метою вибору матеріалів, що найповніше відповідають конкретним умовам експлуатації (рівень напружень, вид напружено-деформованого стану, температура, вологість, циклічність навантаження, швидкість деформування тощо).

3. Випробування нових матеріалів для розробки нормативно - технічної документації (державні або галузеві стандарти, технічні умови на продукцію) на певний матеріал, який буде надалі використовуватися у промисловості.

Зазначені види випробувань - це частина науково-дослідних робіт, що виконуються в НДІ і ОКБ (дослідно-конструкторських бюро). Такі роботи супроводжуються, як правило, комплексними лабораторними випробуваннями (вимірювання міцнісних і пружних характеристик з урахуванням часу дії навантаження, силових режимів, впливу навколишнього середовища тощо).

Однією з важливих задач, що розв'язуються при випробуванні виготовлених промисловістю матеріалів - це оцінка відповідності цих матеріалів вимогам нормативно-технічної документації (далі - НТД) щодо їх експлуатаційних характеристик.

Ці роботи виконуються в спеціалізованих лабораторіях, акредитованих згідно з чинним законодавством. На підставі таких випробувань підтверджується якість виробленої або закупленої продукції (матеріалу).

Що необхідно знати, перш, ніж приступати до планування експерименту та вибору відповідного класу апаратури?

1. Обов'язкова інформація:

- умови експлуатації матеріалу (рівні діючих навантажень, вид НДС, температура, вологість, наявність впливу агресивних середовищ, сонячного опромінення, радіації та інших супутніх факторів);

- режими силових впливів (статичний або динамічний, короткочасний або тривалий, постійний або циклічний); при динамічних навантаженнях (вібраціях) необхідно знати швидкість, частоту та амплітуди сил.

Без цієї інформації вибір апаратури і методик виконання експериментальних робіт є вкрай важким або взагалі неможливим.

2. Бажана інформація:

- передбачуваний клас матеріалу і, отже, орієнтовні (довідникові) значення механічних характеристик (границя міцності, границя текучості, максимальне подовження, температурний діапазон працездатності матеріалу, межа витривалості тощо).

Ця інформація спрощує підготовчі роботи і скорочує час випробувань.

3. Основні види випробувань та класифікація обладнання

Види випробувань. Незважаючи на велику різноманітність видів випробувань конструкційних пластмас і композиційних матеріалів на полімерній основі, більшість з них умовно укладаються в схему, наведену на рис. 1. У цю схему, безумовно, включені не всі види випробувань, але з неї можна отримати уявлення про різноманіття видів впливів, які можуть бути реалізовані в процесі експериментів з даними матеріалами.

Тритучковий, чотириточковий згин



Рис. 1. Основні види випробувань конструкційних пластмас з урахуванням супутніх факторів

На цій схемі найбільш прості види випробувань розташовані ліворуч, найбільш складні - праворуч. Умови випробувань ускладнюються при переміщенні по схемі зверху вниз.

Найбільш складні та, відповідно, найбільш затратні - це випробування при комбінації умов експерименту: наприклад, випробування за підвищених температур з одночасною дією високої вологості при ультрафіолетовому опроміненні (імітація реальних кліматичних умов з урахуванням сонячного опромінення). Зауважимо, що в міру збільшення складності реалізації виду випробувань (переміщення за схемою на рис. 1 зверху вниз і зліва направо) збільшується трудомісткість та вартість випробувань.

Охарактеризуємо основні методи і перерахуємо головні механічні характеристики, які визначаються в процесі реалізації цих методів.

Випробування на міцність за короткочасної дії навантажень

Це найпростіший вид випробувань, який застосовується в більшості випробувальних лабораторій. Необхідне обладнання - стандартна універсальна розривна машина з набором затискувачів для різних типів зразків.

В результаті випробувань може бути отримана діаграма деформування і з її допомогою визначені характеристики міцності і пружності матеріалу (межі міцності і текучості, модуль пружності, відносні деформації на точці плинності при руйнуванні)

Випробування на повзучість, тривалу міцність і релаксацію напружень

Це більш складний вид випробувань, що вимагає спеціальних випробувальних установок. Деякі сучасні типи універсальних випробувальних машин дозволяють проводити випробування на повзучість і релаксацію напружень з використанням додаткових програм. Тривалість випробувань - від декількох годин до декількох місяців.

Дані, що реєструються: деформації повзучості або зусилля в зразку в задані моменти часу, час від початку дії навантаження до моменту руйнування зразка.

Випробування при циклічній дії навантажень

Все вищезазначене відноситься і до даного виду випробувань. Основна складність випробувань полягає в тому, що циклічні дії більш небезпечні з точки зору впливу на випробувальне обладнання. Це означає, що воно має бути більш надійним, ніж те, що застосовується при статичних навантаженнях.

В процесі випробувань вимірюються: деформації повзучості і характеристики витривалості (кількість циклів навантаження до руйнування).

Вимірювання міцності при ударному дії навантаження

Випробування проводяться на спеціальних копрах, які імітують дію удару масивного молота на зразок.

Розрізняють такі способи:

- удар по зразку, який вільно лежить на двох опорах (згинальний удар);
- вигин консольного (жорстко закріпленого) зразка;
- випробування при поздовжньому ударі.

Останній вид випробувань нестандартний, вимагає спеціального обладнання. Ці випробування проводяться, в основному, для матеріалів, призначених для роботи в якості демпферів.

Основна вимірювана характеристика: ударна в'язкість як відношення енергії, витраченої на руйнування, до площі поперечного перерізу зразка. Використовуються зразки з надрізами (стандартні випробування) і без надрізів (дослідні роботи при оцінці кліматичної стійкості матеріалу).

Вимірювання динамічних характеристик за синусоїдальних коливань

Розрізняють такі види випробувань:

- згинальні коливання консольного (жорстко закріпленого) зразка;

- крутильні коливання з додатковою масою;
- поздовжні коливання зразків з додатковою масою.

Останній вид випробувань більш універсальний, оскільки в цьому випадку маємо справу з однорідним напруженим станом на відміну від перших двох. Однак, реалізація цього способу більш складна: доводиться вимірювати відносно невеликі деформації зразка при розтягуванні у порівнянні з досить великими деформаціями, що виникають при вигині або при крученні.

При випробуваннях визначаються такі характеристики:

- динамічні модулі пружності,
- характеристики розсіювання енергії (декременти коливань, модулі втрат, тангенси кута механічних втрат).

Для наступних видів випробувань перерахуємо лише характеристики, які вимірюються в процесі випробувань. Більш докладний опис цих методів наведений у відповідних розділах

Вимірювання температурних характеристик

Визначаються характеристики:

- температура розм'якшення (температура за Віка) і температура плавлення;
- температура крихкості;
- температурна деформація усадки;
- температурні коефіцієнти лінійного розширення, коефіцієнти теплопровідності і теплопередачі.

Останні три характеристики відносяться до фізичних констант і визначаються відповідними методами. Ці характеристики використовуються, наприклад, при вирішенні нестационарних задач для розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкцій у температурних полях.

Випробування на стійкість до тривалих зовнішніх впливів

Досліджувані властивості:

- стійкість до теплового старіння;

- стійкість до старіння під дією УФ (сонячного) опромінення.
- стійкість до природного старіння за спільної дії кліматичних факторів;
- зміна міцності за впливу радіації.
- зміна властивостей за впливу агресивних середовищ (кислоти, луги, бензин, мастила, аміак та інші середовища).

Наступні види випробувань об'єднані в одну групу, яку можна умовно назвати

Спеціальні випробування

Види випробувань і вимірювані характеристики:

- вимірювання твердості (в основному, метод вдавлювання кульки за Бригнелем і метод проникнення індентора за Шором);
- випробування зразків на зріз або зсув (застосовуються тільки для матеріалів, які працюють за цього виду деформації);
- вимірювання адгезійної міцності (міцність зв'язку з іншими матеріалами);
- випробування на розколювання або роздирання зразків;
- випробування на абразивне зношування та визначення коефіцієнтів тертя;
- вимірювання вологопоглинання (зміна розмірів і маси зразків під дією води та інших речовин);
- вимірювання ливарної усадки (для матеріалів, з яких методом лиття виготовляють вироби підвищеної точності).

* * *

Навіть просте перерахування видів випробувань показує, наскільки складною є проблема оцінки якості та придатності нових або широко застосовуваних матеріалів для роботи в реальних експлуатаційних умовах. Безсумнівно, такий широкий спектр випробувань обумовлений підвищеною чутливістю більшості конструкційних пластмас до зовнішніх впливів.

Для правильного вибору випробувального обладнання необхідно знати принципи його класифікації. Це в ряді випадків допоможе заощадити кошти на

придбання нової апаратури, оскільки часто різні типи обладнання взаємозамінні.

Загальна класифікація випробувального обладнання. Відповідно до механічних характеристик, які необхідно визначити, застосовують такі основні види обладнання для випробувань матеріалів:

- розривні і універсальні випробувальні машини;
- установки для випробувань на тривалу міцність і повзучість,
- машини для випробувань на втому,
- установки для випробувань на удар;
- прилади для визначення твердості;
- прилади для термомеханічних випробувань (визначення температури розм'якшення за Віка, температур крихкості, температурної усадки, температурних коефіцієнтів лінійного розширення та інших температурних характеристик);
- прилади для визначення динамічних модулів пружності і механічних втрат при коливаннях;
- машини для випробувань на тертя і знос;
- кліматичні камери для імітації впливу навколишнього середовища;
- прилади для вимірювання деформацій.

Останній тип часто використовується як складова частина інших типів обладнання, але може використовуватися і окремо для деяких видів випробувань (екстензометри, катетометр, мікрометри, фото або відео реєстратори).

Класифікація випробувальних машин. Випробувальні машини, в залежності від видів деформації, способів прикладання сили, типів вимірювачів сили та видів випробувальних матеріалів, поділяють на такі типи (табл. 1).

Таблиця 1. Основні типи випробувальних машин

	назва машини	вид деформації
За видом деформації зразка	<i>розривні</i>	<i>Розтяг</i>
	<i>преси</i>	<i>Стиск</i>
	<i>ротаційні</i>	<i>кручення</i>
	<i>універсальні</i>	<i>розтяг, стиск, згин, кручення</i>

За способом силозбудження	<i>Електромеханічні</i>
	<i>Електрогідравлічні</i>
За типом силовимірювального пристрою	<i>з маятниковим або важільно-маятниковим силовимірювачем</i>
	<i>з торсіонним силовимірювачем</i>
	<i>з електричним (тензорезисторним, вібраційно- частотним або іншим) силовимірювачем</i>
За видом випробува- льних матеріалів	<i>для випробування зразків металів</i>
	<i>для випробування будівельних матеріалів</i>
	<i>для випробування полімерних матеріалів (конструк- ційні пластмаси та гума)</i>
	<i>для випробування текстильних матеріалів</i>
	<i>для випробування декількох видів матеріалів</i>

Схеми, що відображають компоновку, і складові частини машин повинні відповідати принципам блочно-модульного конструювання (модульного формування техніки).

4. Основні параметри засобів випробувань

Основні параметри випробувальної апаратури [48]

До основних параметрів належать:

- кількість діапазонів вимірювань (не менше трьох);
- повний діапазон навантажень;
- діапазон швидкостей переміщень затискувачів;
- похибки вимірювання зусиль і деформацій;
- ціна поділки вимірювальних пристроїв;
- температурний діапазон нагрівальних та охолоджувальних камер;
- інші параметри .

Ці параметри встановлюються окремо для кожного виду випробувального обладнання і залежать від вимог до випробувань.

Апаратура повинна мати мінімальну інерційність за встановлених режимів випробувань. Інерційність впливає на здатність апаратури достовірно фіксувати вимірювану величину при випробуванні. Інерційність характеризують часом встановлення показання реєструючого приладу.

Час встановлення показання – це мінімальний час, протягом якого вимірювана величина фіксується, на що вказує реєструючий пристрій апаратури, з похибкою, що не перевищує передбачену в стандартах або технічних умовах на метод випробувань.

Час встановлення показання вказується в технічній документації на апаратуру.

Обладнання та апаратура, які використовуються для механічних випробувань, мають забезпечувати виконання режиму випробувань згідно з вимогами, передбаченими у стандартах на методи випробувань.

Спроможність випробувальних машин підтримувати режим за навантаженням і деформацією визначається їх податливістю.

Податливість приладів і машин виражається відношенням величини переміщення (в напрямку дії сили) робочих органів, дотичних до зразка, до величини сили, що викликала це переміщення.

В розривних та універсальних машинах має бути забезпечена можливість встановлення теплових і холодильних камер для проведення випробувань за підвищених і знижених температур. Границі і точність регулювання підвищених і знижених температур встановлюють в технічних умовах на машини у відповідності з вимогами стандартів на методи випробувань матеріалів.

* * *

Для випробування конструкційних пластмас використовуються, як правило, універсальні машини з електромеханічним приводом та з електричним вимірювачем сили. Найбільше граничне навантаження таких випробувальних машин не перевищує 100 кН.

Для випробування гум призначені розривні машини з електромеханічним приводом та з електричним або маятниковим вимірювачем сили. Найбільше граничне навантаження машин для випробування гум вибирається з ряду 0,01;

0,05; 0,5; 5; 10; 20; 50 та 100 кН в залежності від механічних характеристик гуми та розмірів зразків.

Гранична допустима відносна похибка вимірювання навантаження машин для випробувань конструкційних пластмас та гум при прямому ході рухомого затискувача не повинна перевищувати $\pm(0,5 \dots 1,0)$ % від вимірюваного навантаження. Похибки вимірювання навантажень при випробуванні інших матеріалів наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Границя допустимої похибки вимірювання навантажень (зусиль) при прямому ході у відсотках від вимірюваного навантаження

Група машин	0-Н	1-Н	2-Н	3-Н
Границя допустимої похибки	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$

Гранична допустима відносна похибка вимірювання деформації (видовження при розтяганні, скорочення при стисканні, прогину при згинанні) при випробуваннях зазначених матеріалів має знаходитися в межах, що вказані в табл. 3. Границя допустимої похибки вимірювання і записи деформації в машинах, обладнаних електричними вимірювачами деформації, не повинна перевищувати $\pm 2,0$ % від верхньої границі діапазону вимірювача деформації.

Таблиця 3. Границя допустимої похибки вимірювання деформації (видовження) у відсотках від верхньої границі діапазону вимірювача

Група машин	1-Д	2-Д	3-Д	5-Д
Границя допустимої похибки	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$	$\pm 5,0$

Значення масштабів запису деформації (видовження) зразка і переміщення активного захвату обирають з ряду: 2000:1; 1000:1; 500:1; 100:1; 50:1; 20:1; 10:1; 5:1; 2:1; 1:1; 1:2; 1:5; 1:10.

Значення відношень найбільшого граничного навантаження до найменшого і розподіл машин на групи за цим параметром вказані в табл. 1.4.

Таблиця 4. Відношення найбільшого навантаження до найменшого

Група машин	1-О	2-О	3-О	4-О	5-О	6-О	7-О	8-О
Відношення навантажень	10000	5000	1000	500	200	100	50	20

Діапазон регулювання швидкостей переміщення активного захвату без навантаження і розподілення машин на групи за цим параметром вказані в табл. 5. Групу, найбільшу швидкість і діапазон швидкостей вказують в технічних умовах на випуск машин.

Таблиця 5. Відношення найбільшої швидкості переміщення захвату до найменшої

Група машин	1-Ш	2-Ш	3-Ш	4-Ш	5-Ш	6-Ш
Відношення швидкостей	100000	50000	10000	1000	100	10

Примітка: Допускається використання інших діапазонів регулювання швидкостей, що обираються з ряду $1 \cdot 10^n$, де n дорівнює 0 або будь-якому цілому числу.

Значення найбільших швидкостей переміщення активного захвату встановлюють в діапазоні від 2 до 1000 мм/хв.

Великі літери в позначеннях груп машин в табл. 2 - 5 означають: Н – навантаження (зусилля), Д – деформація, О – діапазон навантажень; Ш – діапазон регулювання швидкостей.

В розривних та універсальних машинах має забезпечуватись можливість встановлення теплових і холодильних камер для проведення випробувань за підвищених і понижених температур. Границі і точність регулювання підвищених і понижених температур встановлюють в технічних умовах на машини у відповідності до вимог стандартів на методи випробувань матеріалів.

Спроможність випробувальних машин підтримувати режим за навантаженням і деформацією визначається їх податливістю [48].

Приклад. Випробувальна універсальна машина з маятниковим силовимірювачем. Граничне навантаження 5,0 кН. Податливість за шкалою 5,0 кН – 0,005 мм/Н, за шкалою 2,5 кН – 0,01 мм/Н, за шкалою 0,5 кН – 0,025 мм/Н.

Повний середній строк служби машин має бути не меншим 15 років.

5. Загальні вимоги до зразків та технології їх виготовлення

Не можливо встановити вимоги, які були б універсальними – придатними до всіх видів випробувань. Можна сказати лише про найбільш загальні вимоги.

Форма і розміри зразків для механічних випробувань (рис. 2 – 5) передбачені відповідними стандартами [34, 35, 38, 48] і технічними умовами на пластмаси. Форму і розміри зразків обирають, враховуючи при цьому вид і величину деформацій, що вимірюються, а також анізотропію, пористість та інші особливості випробовуваних матеріалів.

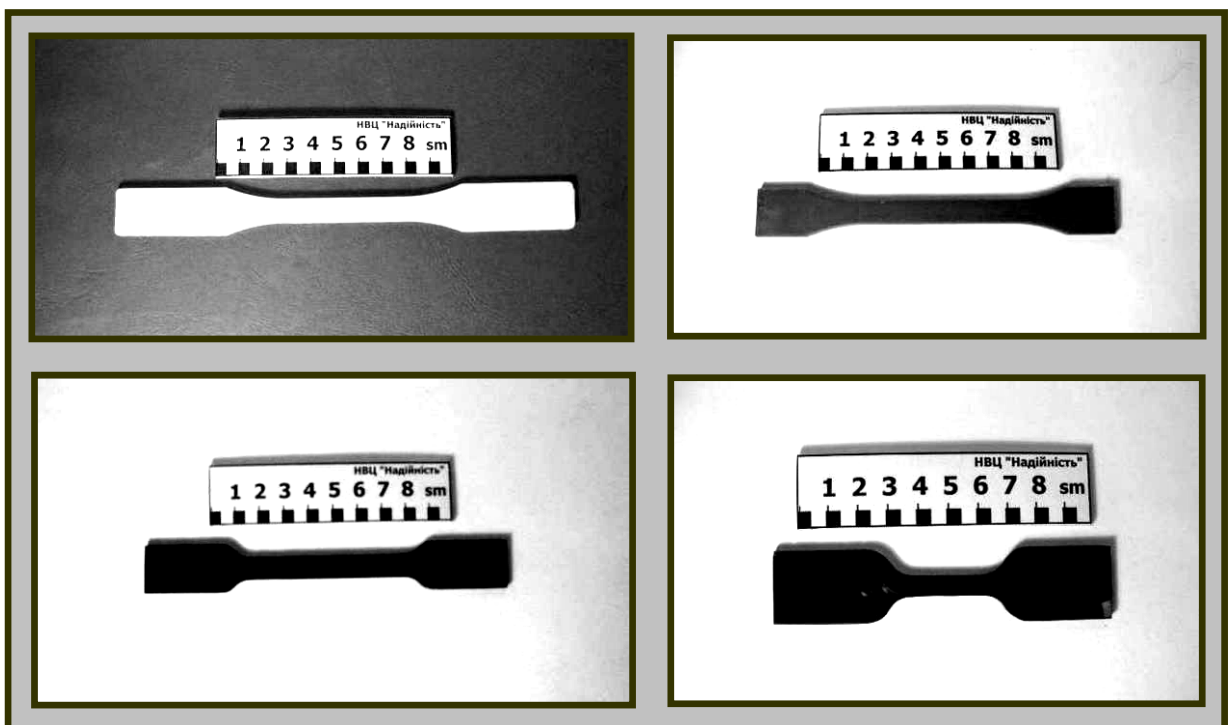


Рис. 2. Стандартні зразки (двобічні лопатки) для випробувань на розтяг

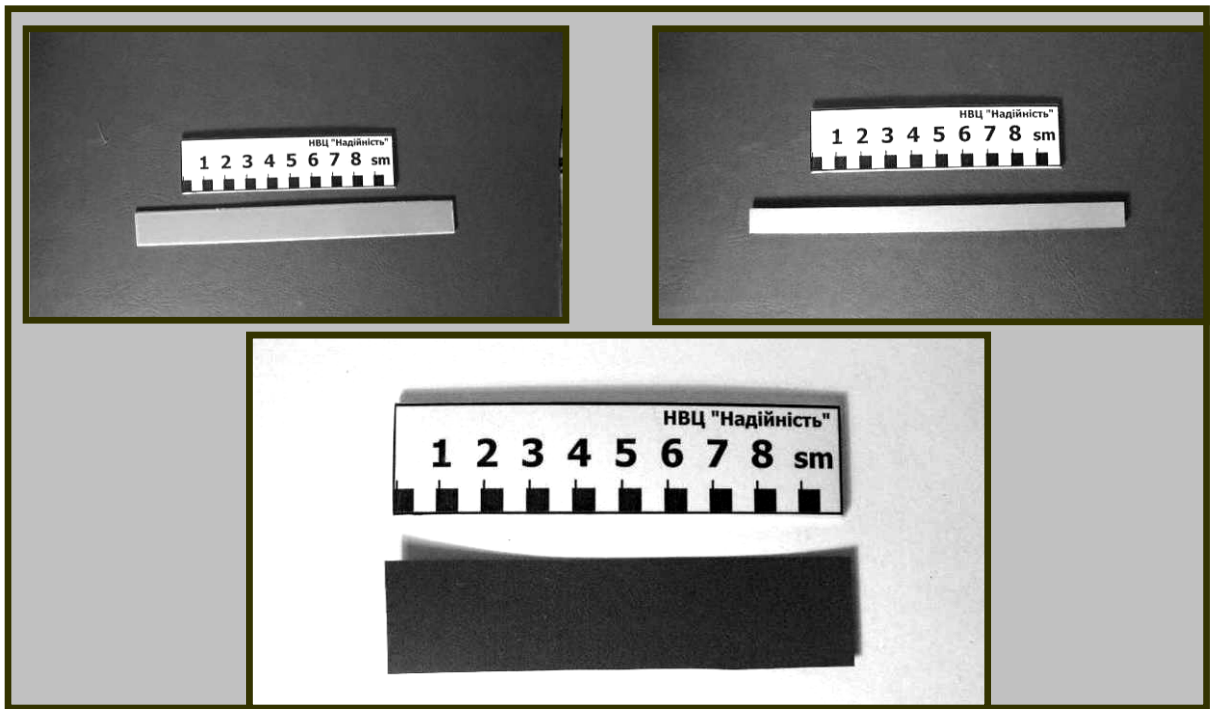


Рис. 3. Стандартні зразки (бруски та смужки) для випробувань на розтяг

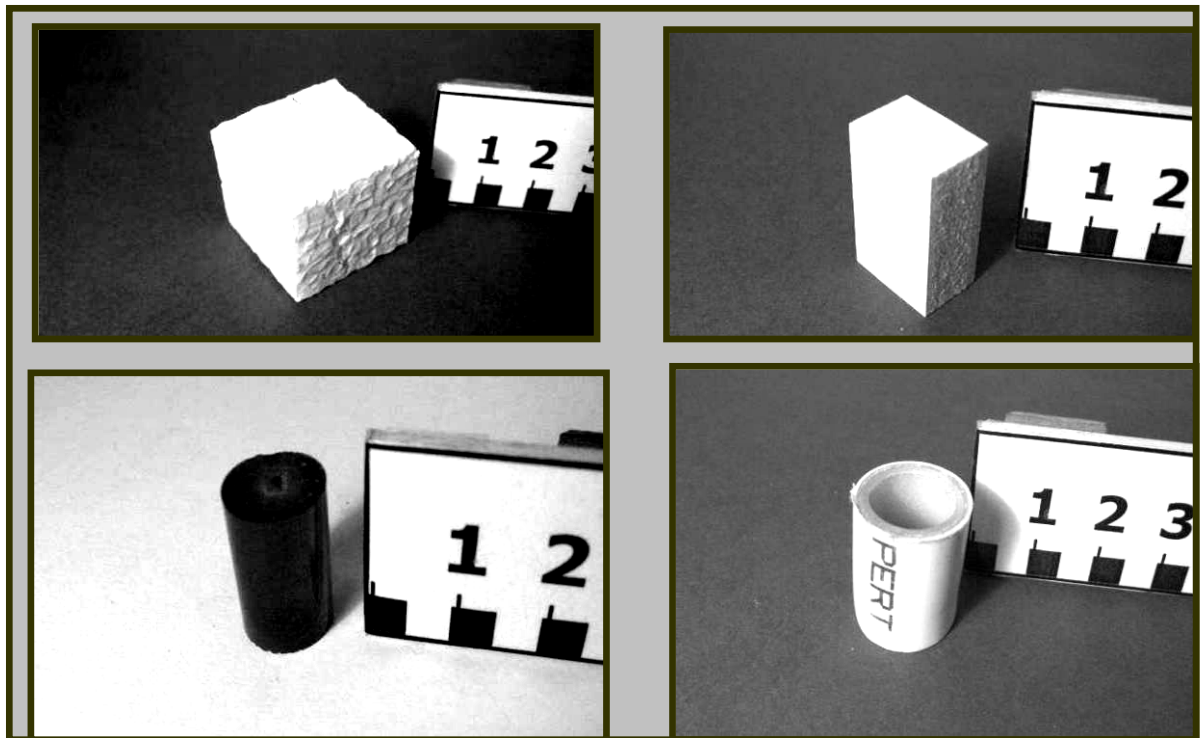


Рис. 4. Стандартні зразки (призматичні, циліндричні та трубчасті) для випробувань на стиск

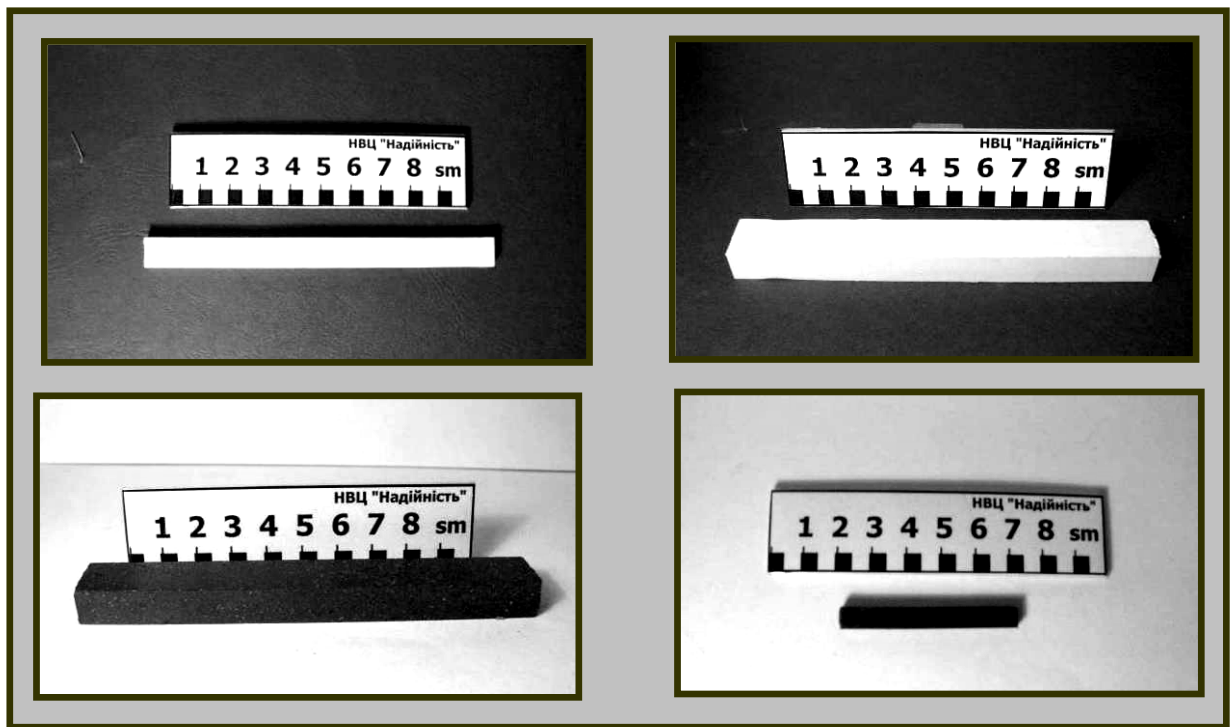


Рис. 5. Стандартні зразки (бруски) для випробувань на згин

Види і форми зразків: прямокутні призми, двосторонні лопатки, смужки, стрічки та інші.

Зразки пластмас для випробувань на розтяг [38]: відношення довжини робочої ділянки $l_{\text{роб}}$ до максимального розміру поперечного перерізу зразка (частіше це ширина робочої частини) b_{max} не має бути меншим, ніж 5:1.

При меншому співвідношенні виникає ймовірність виникнення неоднорідного напруженого стану в зонах, що прилягають до місць закріплення зразків. Також підвищується ймовірність розриву зразка в затискувачі.

Зразки пластмас для випробувань на стиск [34]: відношення висоти зразка h до мінімального розміру поперечного перерізу зразка b_{min} має знаходитися в межах від 1,5 до 3,0.

При порушенні цього співвідношення в менший бік виникають труднощі при вимірюванні деформацій (занадто короткі зразки). Крім цього, починають позначатися ефекти тертя в місці контакту зразка з опорною плитою.

При співвідношенні, більшому, ніж 3:1, виникає небезпека втрати стійкості зразка.

Для випробування на статичній і двоопорний згин використовуються зразки, передбачені стандартом [35].

Зразки з термопластів [41] можуть бути виготовлені на обладнанні для лиття під тиском або методом пресування (ливарні машини, форми, матриці, пуансони та ін.). Режими лиття і методи пресування не повинні призводити до змін властивостей матеріалів.

Зразки з реактопластів [40] можуть виготовлятися на фрезерних та токарних верстатах. При цьому різальний інструмент і швидкість обробки не повинні призводити до механічних або термічних пошкоджень зразків.

Зразки мають бути виготовлені з дотриманням допусків на кривину і паралельність, передбачених в стандартах на методи випробувань, і не повинні мати порожнин, раковин, сколів, здуттів, тріщин, міхурів та інших дефектів, які можуть виявлятися при зовнішньому огляді або дефектоскопії.

Вирізання зразків з *анізотропних матеріалів* проводиться вздовж головних осей пружної симетрії.

Зразки перед випробуванням слід нумерувати. Місце і спосіб нанесення номера обирають так, щоб не викликати змін механічних властивостей зразка. Якщо зразок при випробуваннях руйнується на дві частини, то маркування наноситься так, щоб на обох частинах зберігався номер.

Вимоги до кількості випробувальних зразків. Кількість зразків, необхідна для випробування, встановлюється технічними умовами на пластмасу. При відсутності зазначених вимог (наприклад, при проведенні дослідницьких робіт з визначення характеристик нових матеріалів) мінімальна кількість зразків встановлюється згідно рекомендацій стандартів з урахуванням вимог методів випробувань та точності визначення вимірюваної величини з заданою ймовірністю.

При виконанні дослідницьких робіт, пов'язаних з розробкою та впровадженням нових матеріалів для визначення середніх значень коефіцієнтів варіації механічних характеристик однієї марки пластмаси має випробуватися не менше 10 партій цієї марки, в кожній з яких – не менше 25 зразків.

Основні вимоги до технології виготовлення зразків

Зразки для вимірювання механічних характеристик рекомендовано виготовляти у формі прямокутної призми або лопатки. Форма, розміри, допуски та спосіб виготовлення мають бути вказані в стандартах на методи випробувань або в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію [61]. Плити та листи повинні мати гладку рівну поверхню без здуттів, сколів, тріщин, раковин та інших дефектів, що видимі при п'ятиразовому збільшенні. При виготовленні зразків, що піддаються випробуванням, необхідно досягати якомога більшої ідентичності в технології.

Виготовлення зразків термопластичних пластмас методом лиття під тиском [41]. Виливні машини повинні забезпечувати регулювання та контроль таких параметрів роботи: зусилля, що прикладається до поршня або шнеку при його поздовжньому переміщенні; кількість термопласту, що надходить до нагрівного циліндру за один цикл (дозування за об'ємом або масою); тривалість одного циклу лиття та його елементів; температура нагрівного циліндру та температура термопласту у соплі нагрівного циліндру.

Час перебування термопласту в нагрівному циліндрі машини має бути мінімальним, щоб виключити його термічне розкладання. Для випробувань відбирають зразки, що виготовлені тільки у процесі лиття, що установився, в умовах безупинної роботи виливної машини та дублюванні кожного циклу. Решту зразків виключають.

У зразків, відібраних для випробування, видаляють літник, а його рештки зачищають. Випробування зразків здійснюють не раніше, ніж через 16 годин з моменту їх виготовлення, якщо в нормативно-технічній документації на конструкційну пластмасу відсутні вказівки про попередню теплову обробку для зняття внутрішніх теплових напружень, викликаних нерівномірним охолодженням різних частин зразка у формі.

Виготовлення зразків термопластичних пластмас методом прямого пресування [41]. Прес, що створює необхідний постійний тиск, має допускати регулювання цього тиску з точністю до $\pm 10\%$. Прес-форма має заповнюватися в

один прийом, нагріватися та охолоджуватися з точністю до $\pm 3^{\circ}\text{C}$ в усіх точках поверхні, що утворює форму зразка.

Прес-форма має бути сконструйована та виготовлена так, щоб зусилля преса передавалося на термопласт без значних втрат до закінчення циклу пресування і щоб тиск під час пресування був спрямований перпендикулярно до широкої частини зразка.

Поверхня формуючої порожнини прес-форми має бути виготовлена з матеріалу, що не викривлює термопласт, та стійкого до корозії.

Основні операції пресування зразків:

- нагрівання прес-форми до температури $40-50^{\circ}\text{C}$ або близької до температури пресування; завантаження розкритої форми відповідною ваговою кількістю термопласту; нагрівання завантаженого у форму термопласту, при цьому для покращення теплопередачі від стінок прес-форми до термопласту опускають пуансон (або підіймають матрицю) таким чином, щоб термопласт до досягнення температури пресування знаходився під тиском до $0,4\text{ МПа}$;

- витримка термопласту при температурі пресування та зазначеному невеличкому тиску протягом $5-15\text{ хв.}$ для рівномірного прогріву всієї його маси;

- підвищення тиску до необхідної величини, але не менше $3,5\text{ МПа}$, витримка термопласту протягом необхідного часу (в залежності від форми та виду термопласту) за цього тиску та температури пресування;

- охолодження прес-форми, без зниження тиску, до температури, за якої зразок, що знаходиться у прес-формі, можна вилучити без пошкодження його поверхні та зміни форми;

- розкриття прес-форми та вилучення охолодженого зразка термопласту.

Зразки випробують не раніше, як через 16 годин після їх виготовлення.

Виготовлення зразків термореактивних пластмас методом пресування [40]. Для виготовлення зразків з реактопластів використовують гідравлічні преси, що забезпечують регулювання та контроль таких параметрів:

- тиск на матеріал під час пресування з похибкою не більше 10% ;

– температура прес-форми (при відсутності обігрівальної системи у прес-форми) приладом класу 0,5;

– тривалість циклу пресування та його основні стадії.

Прес-форма має відповідати таким вимогам:

– завантажувальна камера повинна мати розміри, що дозволяють завантажувати матеріал в один прийом; тиск пресування має бути направлений перпендикулярно до широкої площини зразка, якщо в нормативно-технічній документації відсутні інші рекомендації;

– різниця між температурами точок поверхонь прес-форми, що утворюють форму зразка, не повинна перевищувати $\pm 3^{\circ}\text{K}$ від заданої температури;

– тип обігрівача - електричний, рідинний або з застосуванням пару високого тиску; обох половинах прес-форми на відстані 2-3 мм від поверхні, що утворює форму зразка, повинні бути передбачені отвори для приладів контролю температури;

– поверхні матриці та пуансона, що утворюють форму зразка, мають бути відполіровані, мати шорсткість Ra 0,160 мкм та жорстко хромовані з товщиною шару хрому не менше 0,02 мм;

– поверхня порожнини матриці, що утворює форму зразка, повинна мати маркування, що видавлюється на зразку та вказує бік, до якого прилягає матриця; маркування не має впливати на результати випробувань;

– для полегшення видалення готових зразків з прес-форми допускається конусність стінок форми, що не перевищує 2° ; допускається використання шпильок, що виштовхують зразок, якщо це не пошкоджує робочу поверхню зразка.

В завантажувальну камеру прес-форми, прогріту до температури пресування, завантажують однакову за масою або за об'ємом кількість матеріалу в кожному циклі, що забезпечує одержання на зразках допусків, які передбачені в нормативно-технічній документації на матеріал.

Тиск пресування контролюють манометром, клас точності якого має бути не нижчим від 1. У процесі пресування зразків температуру прес-форм вимі-

рюють та регулюють за допомогою термопар. Час між закінченням заповнювання прес-форми матеріалу та початком підвищення тиску не має перевищувати 20 с, якщо в нормативно-технічній документації на матеріал не вказаний інший час.

Час між розкриттям прес-форми та вийманням зразка не має перевищувати 30 с. Для полегшення виймання зразків допускається використання мастил, якщо вони не впливають на властивості матеріалів, що пресуються. Зразки, що мають схильність до короблення, після виймання розміщують в спеціальних пристроях, в яких вони знаходяться під навантаженням до повного охолодження.

У зразках, відібраних для випробувань, перевіряють правильність форми, рівномірність товщини та відсутність дефектів.

6. Загальний порядок проведення випробувань

У цьому підрозділі наведені вимоги до загального порядку проведення випробувань, зокрема до температурних режимів, кондиціонування зразків, обробки результатів та протоколу випробувань.

Кондиціонування зразків [44]. Перед випробуванням зразки кондиціонують при стандартній лабораторній атмосфері. *Кондиціонування* - це витримка об'єктів випробування за певних умов для ліквідації різниці в температурі і вологості зразка і приміщення лабораторії.

Для кондиціонування застосовують один зі стандартних видів атмосфери, характеристики яких зазначені в **табл. 6**. Якщо характеристики матеріалу не залежать від вологості (має бути відомо заздалегідь), то кондиціонують при $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ (помірний клімат) або при $27\pm 2^{\circ}\text{C}$ (тропічний клімат) без регламентації вологості.

Таблиця 6. Характеристики умов кондиціонування зразків перед випробуваннями

Позначення атмосфери	Температура, °С	Відносна вологість повітря, %
23 / 50 (помірний клімат)	$23 \pm 2^{\circ}\text{C}$	$50 \pm 5\%$
27 / 65 (тропічний клімат)	$27 \pm 2^{\circ}\text{C}$	$65 \pm 5\%$

Час кондиціонування:

- 23°C при 50% і 23°C при 65% відносної вологості - не менше 4-х діб;
- 23°C і 27°C без регламентації вологості - не менше 4-х годин.

Забезпечення температурного режиму в камері при випробуваннях.

У деяких стандартах температуру рекомендовано вибирати з таких рядів:

- знижені температури: $-65, -55, -40, -25, 0^{\circ}\text{C}$;
- підвищені температури: $+35, +50, +60, +70, +80, +90, +100, +105, +120, +150, +180, +200, +225, 250, +275, +300, +325, +350, +400, +450, +500, +600^{\circ}\text{C}$.

Для умов лабораторії $T = 23 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

На практиці при проведенні науково-дослідних робіт температуру випробувань встановлюють з міркувань доцільності. Як показує практика, температура має бути кратною 10°C або 5°C .

Методики проведення випробувань і реєстрація характеристик регламентується відповідними керівними документами (Державні стандарти та інші нормативні документи на конкретні методи випробувань).

У ряді технічних умов на продукцію також бувають конкретизовані деякі методи випробувань або наводяться специфічні методи, які можна застосовувати тільки до даного виду продукції.

Перед випробуванням, після кондиціонування, зразки вимірюють у робочій частині з точністю, передбаченою в стандартах на методи випробування. При визначенні показників міцності, що характеризують руйнування зразка, за результат вимірювання приймають мінімальне значення площі поперечного пе-

перізу, а при визначенні показників деформаційних - середнє арифметичне трьох вимірів поперечного перерізу. Після перевірки розмірів зразки розмічають, наносять на них позначки, що визначають розміри бази, за необхідності вимірювання деформації, і мітки, що визначають положення затискувачів випробувальної машини. При нанесенні позначок властивості зразків не повинні змінюватися.

Вимірювальну шкалу приладу обирають таким чином, щоб забезпечити точність вимірювання, передбачену стандартом на метод випробування, з урахуванням похибки приладу в різних частинах шкали, зазначеної в технічній документації на прилад.

Режим випробування, що характеризується швидкістю деформування або навантаження, вибирають з урахуванням розмірів зразка відповідно до стандартів і технічних умов на методи випробування. При виборі режиму випробувань враховують значний вплив часу на механічні характеристики пластмас.

Випробувальну машину або прилад для встановлення режиму випробувань налаштовують з урахуванням їх податливості так, щоб забезпечити виконання вимог стандартів на методи випробувань.

Якщо послідовно вимірюють кілька показників, то для достовірного виміру кожного з них проміжок часу між наступними один за одним вимірами повинен перевищувати час встановлення показання кожного з використовуваних при вимірюванні приладів.

Зразки в затискувачах встановлюють так, щоб виключити рух зразка відносно затискувача в місці кріплення при випробуванні, не викликати при цьому його руйнування в місці закріплення і забезпечити напрямок дії сили, передбачений в стандартах на методи випробувань.

7. Обробка та реєстрація результатів випробувань

Результати механічних випробувань представляють графічно або чисельно, відповідно до вимог стандарту на методи випробувань. Результати виражають числовими значеннями, а графічний спосіб використовують в якості додаткового.

При графічному представленні результатів залежність між вимірними величинами зображують у прямокутній системі координат із застосуванням рівномірних шкал (тобто шкал, вздовж яких відстані між двома поділками, що відповідають зміні величини, відкладені по осі на одне і те ж значення, рівні).

Масштаби рівномірних шкал по осях координат вибирають так, щоб отримана залежність проходила приблизно під кутом $45-60^{\circ}$. Величини подаються на графіку таким чином, щоб можна було визначати похибку, яка б не перевищувала похибки вимірювання даної величини.

При чисельному вираженні результатів випробувань знаходять середнє значення показника i , якщо це передбачено в стандартах на пластмасу або метод випробування, визначають показники статистичної обробки [48].

Припустимо, що в ході випробувань отримано ряд окремих експериментальних значень якої-небудь характеристики матеріалу

$$X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_N,$$

де N - загальна кількість окремих значень показника, що визначаються та беруться до розрахунку.

Визначаються такі статистичні характеристики:

1. Середнє значення (математичне очікування):

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}$$

2. Середнє логарифмічне значення рекомендується, наприклад, при визначенні витривалості (статичної, динамічної або втомної), при обробці результатів тривалих випробувань, наприклад, при визначенні довговічності, коли має місце великий розкид результатів. У цих випадках замість вихідних чисел Y оперують з їх логарифмами, вважаючи за індивідуальне значення

$$X_i = \lg Y_i, \quad \bar{X} = \frac{\sum X_i}{N}.$$

В кінці розрахунку знаходять $\bar{Y} = 10^{\bar{X}}$.

3. Стандартне відхилення окремих значень:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}.$$

4. Стандартне відхилення окремих значень:

$$\bar{S} = \frac{S}{\sqrt{N}}.$$

5. Границі довірчого інтервалу $2\Delta X$, в яких знаходиться значення показника X , визначається таким чином:

- для нижньої границі $\bar{X} - \Delta X$,
- для верхньої границі $\bar{X} + \Delta X$,

де ΔX – ймовірне відхилення показника X від отриманого середнього значення \bar{X} ; t - критерій точності за табл. 7 (визначають, виходячи з заданої точності і кількості експериментів N).

Ймовірне відхилення ΔX вираховують за формулою

$$\Delta X = \frac{t \cdot S}{\sqrt{N}} = t \cdot \bar{S} = Q \cdot S,$$

$$\text{де } Q = \frac{t}{\sqrt{N}}.$$

6. Коефіцієнт варіації середнього значення

$$V = \frac{\bar{S}}{\bar{X}} \cdot 100\%.$$

7. Відносна помилка

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%.$$

Таблиця 7. Значення критерію t розподілу нормованих відхилень в малій вибірці для трьох величин імовірності α (при двосторонній довірчій ймовірності)

Кількість зразків N	t для величин імовірності α		
	0,90	0,95	0,99
2	6,314	12,71	63,66
3	2,920	4,303	9,925
4	2,353	3,182	5,841
5	2,132	2,776	4,604
6	2,015	2,571	4,032
7	1,943	2,477	3,707
8	1,895	2,365	3,499
9	1,859	2,306	3,355
10	1,833	2,262	3,250
15	1,761	2,145	2,977
20	1,734	2,101	2,878
25	1,711	2,064	2,797
30	1,697	2,042	2,750
40	1,684	2,021	2,704
50	1,676	2,009	2,678

Запис результатів випробувань має забезпечувати повноту опису зразка, умов вимірювання, методу вимірювання, методу розрахунку результату і отриманої похибки.

У протоколі зазначаються такі відомості про випробування:

- найменування та марка пластмаси;
- позначення стандарту або технічних умов на пластмасу;
- метод виготовлення, основні розміри виробу і місце вирізки зразків;
- найменування підприємства - виготовлювача і номер партії;
- метод виготовлення зразків;
- умови кондиціонування зразків та атмосферні умови при випробуваннях;
- позначення стандарту на метод випробування та тип приладу;
- кількість випробовуваних зразків;
- окремі значення показника кожного зразка, середнє значення показника, стандартне відхилення середнього значення, коефіцієнт варіації та відносна похибка;
- дата випробування.

Окрім перерахованих відомостей про матеріал та методи випробувань, у протоколах надаються додаткові відомості, зміст яких залежить від конкретного виду випробувань. Перелік цих обов'язкових відомостей буде наданий окремо при описанні кожного виду випробувань.

1. ВИПРОБУВАННЯ ПРИ КОРОТКОЧАСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

1.1. Обладнання для вимірювання характеристик міцності та пружності

1.1.1. Загальні вимоги до обладнання

Стандартом [48] встановлюються вимоги до вертикальних розривних машин з навантаженнями від 0,5 до 100 кН, що призначені для статичних випробувань на розтяг зразків пластмас за [38]. Цей стандарт не розповсюджується на машини спеціального призначення.

Основні технічні характеристики машин мають відповідати зазначеним в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Основні технічні характеристики машин для випробувань пластмас на розтяг

Найменування основних параметрів та розмірів	Норми					
	0,5	5	10	20	50	100
Найбільше граничне навантаження, кН	0,5	5	10	20	50	100
Найменше граничне навантаження, кН	0,02	0,2	0,4	0,8	2	4
Число діапазонів вимірювання навантаження, не менше	3					
Допустима похибка при прямому ході (навантаженні) від вимірювальної величини, починаючи з 0.2 від найбільшого граничного значення кожного діапазону вимірювання, не більше	±1%					

Вимоги до чутливості випробувальних машин. Абсолютна чутливість машин з аналоговим відліковим пристроєм в межах діапазону вимірювання навантаження повинна бути такою, щоб прикладання або зняття додаткового навантаження, що дорівнює ціні поділки відлікового пристрою для вимірювання сили, викликало показання відлікового пристрою не менше, ніж на 0,5 поділки.

Абсолютна чутливість машин с дискретним відліковим пристроєм в діапазоні вимірювання повинна бути такою, щоб прикладання або зняття додаткового навантаження, що дорівнює 0,3% граничного значення діапазону, викликало зміну показів відлікового пристрою не менше, ніж на 0,1% граничного значення діапазону.

Вимоги до ціни поділок відлікових пристроїв та границь випробувань машин. Ціна поділки відлікового пристрою, що вимірює навантаження, повинна бути:

не більше 0,2% найбільшого граничного значення кожного діапазону вимірювання для кругової шкали;

не більше 0,4% найбільшого граничного значення кожного діапазону вимірювання для прямолінійної шкали.

Співвідношення найбільших граничних значень діапазону вимірювання навантаження повинні послідовно вибиратися з ряду 1; 2; 5; 10; 20. При використанні цифрових (дискретних) відлікових пристроїв допускається один діапазон вимірювання, при цьому ціна поділки повинна бути не більше, ніж 0,02% від найбільшого граничного навантаження машини.

Вимоги до приладів, що записують діаграми деформування. Машини повинні мати самозаписуючий прилад для запису результатів випробувань в координатах «навантаження - переміщення активного затискувача» або «навантаження - час». Число масштабів запису має бути не меншим трьох. Значення масштабів вибираються з ряду: 1:5; 1:1; 5:1; 10:1; 20:1; 50:1; 100:1. Висота ординати діаграми, що відповідає найбільшому граничному значенню діапазону вимірювання навантажень, має бути не меншою 250 мм.

Машини мають оснащуватись приладом для вимірювання деформації робочої частини зразка, що дозволяє проводити запис у координатах «деформація – час». Число масштабів запису має бути не меншим трьох. Значення масштабів вибирається з ряду: 10:1; 20:1; 50:1; 100:1; 200:1; 500:1; 1000:1.

Допустима похибка запису навантаження не повинна перевищувати в кожному діапазоні вимірювання $\pm 2\%$ від вимірюваної величини, починаючи з 0.2 граничного значення діапазону.

Допустима похибка запису деформації не повинна перевищувати в кожному діапазоні вимірювання $\pm 3\%$ від граничного значення діапазону вимірювання.

Вимоги до додаткових пристроїв випробувальних машин. Випробувальні машини можуть бути укомплектовані пристроями для випробувань на згин та стиск за стандартами [34, 35].

Випробувальні машини також можуть мати нагрівальні та холодильні камери, що забезпечують підтримку необхідної температури в робочому об'ємі камери з точністю:

- $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ для температури від мінус 100 до 0°C ;
- $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ для температури від 40 до 100°C ;
- $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ для температури від 40 до 150°C ;
- $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ для температури від 40 до 200°C ;
- $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ для температури від 40 до 300°C .

Інші вимоги до випробувальних машин. Рівень звукового тиску машини, що працює, не повинен перевищувати 75 дБ.

Ймовірність безвідмовної роботи за 500 годин при довірчій імовірності $P^*=0,8$ має бути не менше 0,9 – для машин без нагрівальної або холодильної камер та 0,85 – для машин з нагрівальною або холодильною камерами. Середній термін служби машин має бути не менше 10 років.

Вимоги до розривних машин для випробувань гум. Стандартом [36] встановлюються вимоги до вертикальних розривних машин, що призначені для

визначення границі міцності та видовження при розриві за методом [33] гумових та гумовотканинних зразків з найбільшими граничними навантаженнями від 0,01 до 100 кН. Цей стандарт не розповсюджується на машини спеціального призначення.

Основні технічні характеристики машин мають відповідати зазначеним в табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Основні технічні характеристики машин для випробувань гум та гумовотканинних матеріалів на розтяг

Найменування основних параметрів та розмірів	Норми							
Граничне навантаження, кН	0,01	0,05	0,5	5	10	20	50	100
Найменше навантаження, кН	0,0004	0,002	0,02	0,2	0,4	0,8	2	4
Число діапазонів вимірювання навантаження	не менше 3							
Висота робочого простору при випробуванні на розтяг, включаючи робочий хід активного затискувача	не менше 1000 мм				не менше 700 мм			
Діапазон швидкості руху активного затискувача без навантаження, не менше	10 - 1000 мм/хв			5 - 500 мм/хв			1 - 100 мм/хв	
Відстань від осі зразка до колони (гвинта), не менше	150 мм				200 мм			

Вимоги до точності вимірювань випробувальних машин. Допустима похибка вимірювання навантаження при прямому ході затискувача не повинна перевищувати $\pm 1\%$ від вимірюваного навантаження, починаючи з 0,2 від найбільшого значення кожного діапазону вимірювання. Така ж вимога для похибки

при роботі машини з самозаписуючим приладом або з пристроєм для фіксації навантаження.

Варіація показів машини в діапазоні вимірювання не повинна перевищувати 1%, а різниця показів між прямим та зворотним ходами – 2% від навантаження, що вимірюється.

Вимоги до ціни поділок відлікових пристроїв та границь випробувань машин. Ціна поділки аналогового відлікового пристрою, що вимірює навантаження, має бути:

- не більше 0,2% найбільшого граничного значення кожного діапазону вимірювання для пристроїв з круговою шкалою;
- не більше 0,4% найбільшого граничного значення кожного діапазону вимірювання для пристроїв з прямолінійною шкалою.

Ціна одиниці найменшого розряду цифрового індикатора навантаження дискретних відлікових пристроїв має бути не більше 0,1% найбільшого граничного значення кожного діапазону навантаження.

Співвідношення найбільших граничних значень діапазону вимірювання навантаження вибираються з ряду 1; 2; 5; 10; 20. При використанні цифрових (дискретних) відлікових пристроїв допускається один діапазон вимірювання, при цьому ціна поділки має бути не більшою, ніж 0,04% від найбільшого граничного навантаження машини.

Показчик відлікового пристрою після розриву зразка або зняття навантаження має повертатися на нульову відмітку з відхиленням не більше:

- $\pm 0,5$ поділки – для аналогових пристроїв з круговою або прямолінійною шкалою поділок;
- ± 2 одиниці найменшого розряду цифрового індикатора або $\pm 0,2\%$ найбільшого граничного значення кожного діапазону – для цифрових відлікових пристроїв, що мають декілька діапазонів вимірювань навантажень;
- $\pm 0,08\%$ найбільшого граничного навантаження – для цифрових відлікових пристроїв, що мають один діапазон.

В машинах має бути пристрій для фіксації найбільшого зусилля, прикладеного до зразка або виробу в процесі випробування.

Вимоги до записуючих пристроїв випробувальних машин. Машини повинні мати самозаписуючі прилади для запису результатів випробувань у координатах: "навантаження - деформація" або "навантаження - переміщення активного затискувача" з масштабами, що зазначені в табл. 1.3, або в координатах "навантаження - час" з швидкостями переміщення діаграмної стрічки 1000, 500, 200, 100 та 20 мм/хв.

Таблиця 1.3. Вимоги до масштабів запису деформації

Найбільші граничні навантаження, кН	Масштаби запису деформації або переміщення затискувача	Висота ординати діаграми, не менше
0,01; 0,05; 0,5; 5; 10	1:5; 1:1; 5:1; 10:1	250 мм
20; 50; 100	1:1; 10:1; 50:1	

Допустима похибка запису деформації не повинна перевищувати $\pm 3\%$ від дійсної деформації, що виражена у відповідному масштабі, починаючи з 10% найбільшої границі вимірювання деформації.

Допустима похибка запису переміщення активного затискувача має бути не більше $\pm 3\%$ від вимірювальної величини, починаючи з 15 мм, а до 15 мм – не більше $\pm 0,5$ мм, що виражено у відповідному масштабі.

Допустима похибка запису навантаження при прямому ході затискувача не повинна перевищувати $\pm 2\%$ від величини, що вимірюється, починаючи з 0,2 від найбільшого граничного значення кожного діапазону вимірювання.

Вимоги до додаткових пристроїв випробувальних машин. Випробувальні машини можуть мати нагрівальні та холодильні камери для випробувань стандартних зразків. Камери з робочим об'ємом до 25 дм³ повинні забезпечувати підтримку температури, що встановилася, з похибкою:

- 1) для камер з граничною температурою до $+100^{\circ}\text{C}$:

- $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ від -100 до 0°C ;
 - $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ від $+40$ до $+100^{\circ}\text{C}$,
- 2) для камер з граничною температурою до $+300^{\circ}\text{C}$:
- $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ від $+40$ до $+250^{\circ}\text{C}$;
 - $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ від $+250$ до $+300^{\circ}\text{C}$.

Швидкість відновлення температури в робочому об'ємі камери має бути не менше 2°C за хвилину.

Інші вимоги до випробувальних машин. Машини мають забезпечувати можливість вимірювання навантаження за заданими значеннями деформацій не менше, ніж у двох точках.

Машина має оснащуватись пристроєм з ціною поділки 1мм для вимірювання деформації робочої ділянки зразка, який градуйований у відсотках видовження.

Відхилення швидкості переміщення активного затискувача від заданого значення не повинне перевищувати $\pm 5\%$.

Машина має забезпечувати співвісність прикладання навантаження, а також плавність прикладання та зняття навантаження.

Ймовірність безвідмовної роботи за 2000 годин роботи при довірчій імовірності $P^*=0,8$ має бути не менше 0,92. Середній термін служби машин повинен бути не менше 10 років.

Комплектність для інших випробувань гум та гумотехнічних виробів.

До комплекту машини мають входити:

- лінійка для вимірювання деформації за переміщеннями затискувачів;
- лінійка для вимірювання деформації за відмітками;
- пристрій для випробувань кільцевих зразків;
- пристрій для визначення міцності зв'язку гуми з металом при розшарування;
- пристрій для випробувань на стиск;
- затискувач для випробувань на зсув;

- затискувач для випробувань зразків з напливом;
- затискувач для випробувань гумових ниток;
- затискувач роликів з діаметром ролика 6 мм;
- затискувач для випробувань плоских зразків.

1.1.2. Загальні відомості про випробувальну машину

Технічні дані випробувальної машини

Універсальна випробувальна машина системи TIRAtest (рис. 1.1) призначена для визначення механічних властивостей металів, пластмас, волокон, композиційних матеріалів тощо.

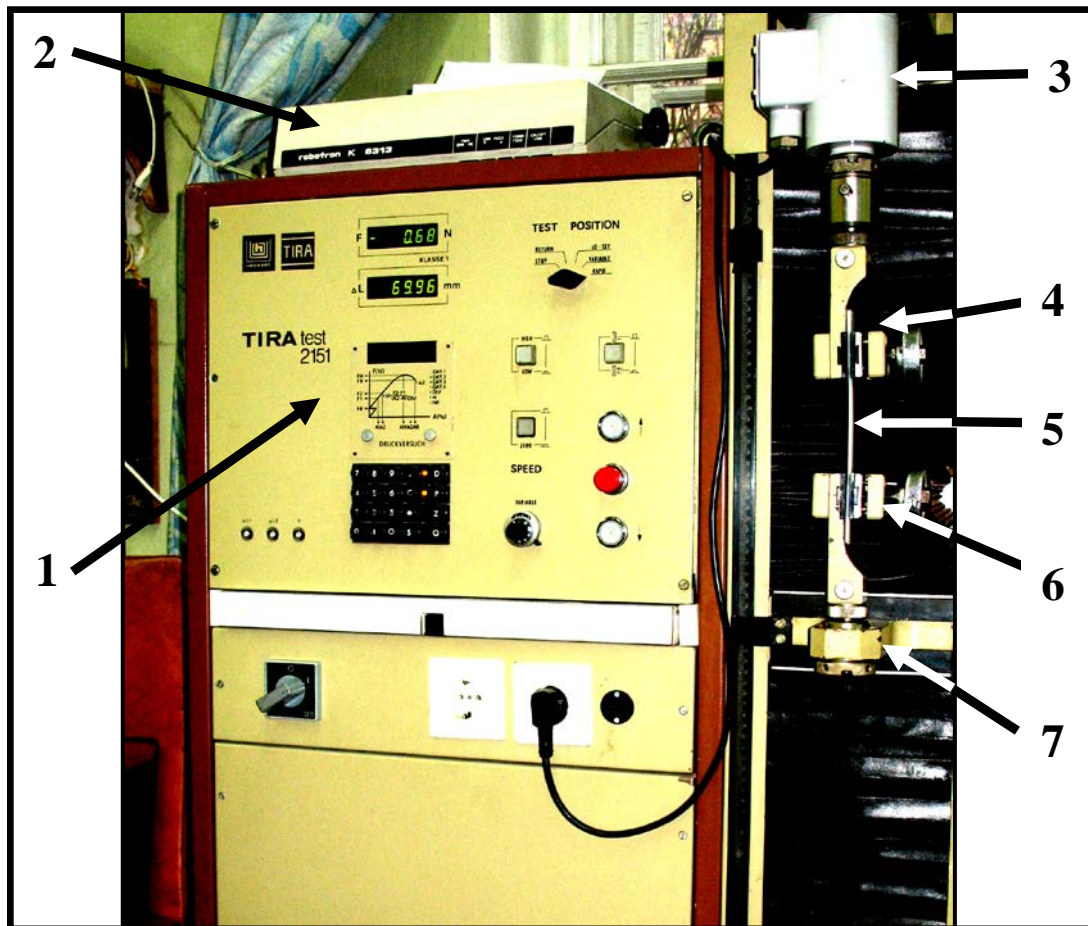


Рис. 1.1. Загальний вигляд випробувальної машини TIRAtest:
1 – пульт керування; 2 – пристрій для друкування ROBOTRON K6313; 3 – динамометр; 4 – нерухомий (верхній) затискувач;
5 – випробувальний зразок; 6 – рухомий (нижній) затискувач;
7 – рухома траверса

За допомогою універсальної випробувальної машини TIRAtest-2151 визначаються характеристики міцності і деформації матеріалів з максимальним зусиллям до 5 кН.

Режими навантаження та деформування		
1). Розтяг, стиск або згин із заданою постійною швидкістю деформування	2). Випробування на повзучість при постійному або циклічному навантаженні	3). Вимірювання релаксації напружень при постійній або циклічній деформації

Особливості випробувальної машини TIRAtest-2151		
1). Реєстрація та обробка результатів вимірювань за допомогою мікропроцесора	2). Можливість здійснювати повні цикли випробувань, що керуються процесором	3). Автоматичне визначення характеристик з друкуванням протоколу та статистики
4). Встановлена система виявлення помилок, що можуть бути допущені при вводі даних	5). Простий ввід даних, що керується оператором, за допомогою клавіатури та застосуванням світлодіодів	6). Автоматичне повернення затискувачів після руйнування зразків або при досягненні заданої деформації

Технічні дані випробувальної машини TIRAtest-2151			
За навантаженням		За деформацією	
Максимальне випробувальне навантаження, кН	5,0	Максимальне переміщення траверси, мм	800
Межі зміни навантаження, кН	від 0,01 до 5,0	Діапазон зміни швидкостей траверси, мм/хв	від 0,5 до 1000
Похибка вимірювання навантаження, %	не більше 1,0	Точність вимірювання переміщень мм	0,01
Пружність (питома деформація) випробувальної системи $8,0 \cdot 10^{-5}$ мм/Н			

Описання блок-схеми випробувальної машини TIRAtest

Загальна блок-схема універсальної випробувальної машини TIRAtest-2151 зображена на рис. 1.2. Через пульт керування (поз. 1) здійснюється введення попередніх даних в обчислювальну машину (режим навантаження, довжина зразка та інші параметри).

Мікропроцесор К1520 за допомогою блока керування регулює роботу вузла навантаження (електромеханічного редуктора), який через механічний зв'язок (черв'ячну передачу) здійснює переміщення рухомої траверси (поз. 7) разом із закріпленим на ній рухомих затискувачем 6 та навантажує зразок 5.

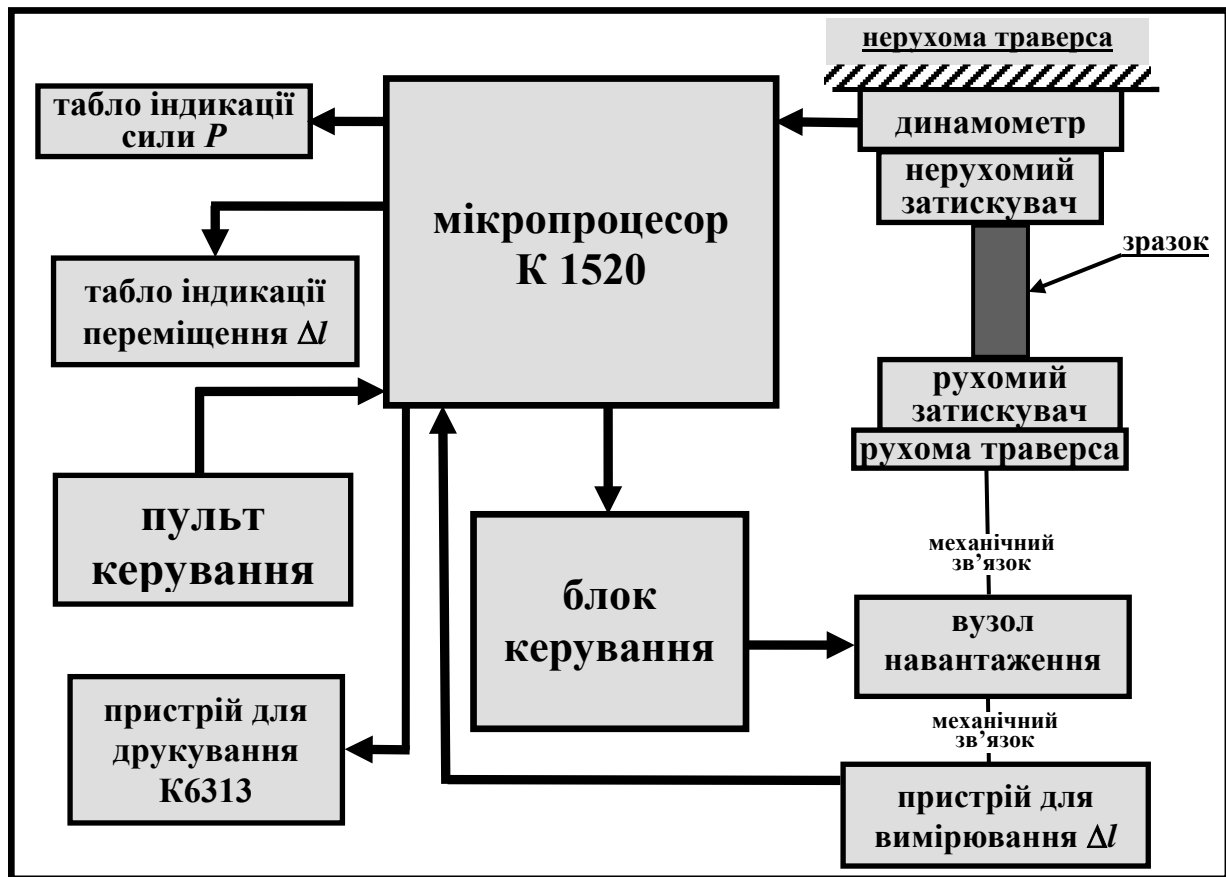


Рис. 1.2. Блок-схема випробувальної машини TIRAtest-2151

Динамометр 3 через нерухомий затискувач 4 вимірює силу P . Пристрій для вимірювання деформацій Δl , закріплений на електродвигуні, що здійснює навантаження, фіксує переміщення рухомої траверси разом з рухомих затискувачем. Данні про силу P та деформацію Δl надходять до мікропроцесора.

Останній запам'ятовує всю інформацію про процес деформування і в ході випробування передає ці дані на індикатори P та Δl . При закінченні випробування мікропроцесор через пристрій для друкування ROBOTRON K6313 (поз. 2) здійснює виведення на папір діаграми деформування та протоколу випробування.

1.1.3. Зовнішні вузли випробувальної машини

Перетворювачі виміру сили (динамометри). Для машини типу TIRAtest-2151 передбачено перетворювачі виміру сили з номінальними значеннями навантажень 10 кН та 10,0 кН (рис. 1.3, поз.1). Вони мають однакові з'єднувальні цапфи діаметром 35 мм та з різьбою M33×1,5 і можуть бути вставлені у верхню жорстку траверсу 2. Перетворювачі сили можуть бути навантажені як на розтяг, так і на стиск.

Перетворювачі суміщаються цапфами з отвором траверси, встановлюються у необхідні кутові положення шляхом обертання навколо поздовжніх осей та закріплюються різьбовими кільцями 3 за допомогою цапфового ключа. При цьому слід уникати дії поперечних сил на тяги перетворювачів сил.

Електричне з'єднування виконується за допомогою штекерного роз'єму на правій боковій частині пульту вимірювання та керування.

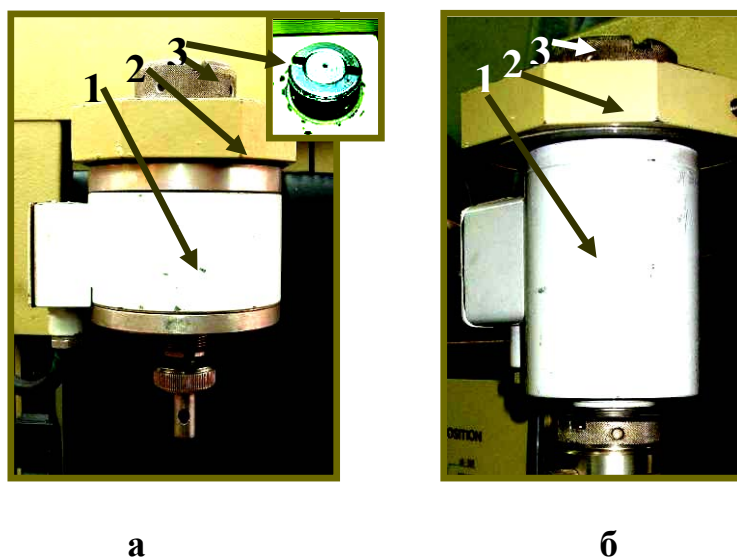


Рис. 1.3. Перетворювачі виміру сили (динамометри) з номінальними значеннями навантажень 1,0 кН (а) та 10,0 кН (б): 1 – корпуси динамометрів; 2 – жорстка верхня траверса; 3 – різьбові кільця

Затискувачі зразків для випробувань на розтяг призначені для надійного утримання зразків під час випробувань та передачі на них зусиль розтягу. Основні вимоги до затискувачів: запобігання проковзуванню поверхні зразка від-

носно елементів затискувача, що утримують зразок; запобігання виникненню пошкодження зразка у місці контакту з елементами затискувача; зручність процесу встановлення зразка у затискувач для полегшення роботи оператора.

У комплект пристроїв до випробувальної машини TIRAtest-2151 входять п'ять пар однакових затискувачів, що призначені для випробувань конструкційних пластмас, листових полімерних матеріалів та металів, полімерних плівок, гум та інших матеріалів на розтяг.

Затискувачі для випробувань зразків конструкційних пластмас. Загальний вигляд цих затискувачів зображений на рис. 1.4. Затискувачі складаються з корпусу 1, затискної скоби 2, знімних губок 3 та затискного гвинта 4. Корпус верхнього затискувача (основний елемент, що передає навантаження на зразок) закріплюється на осі динамометра, яка вставляється у отвір 5 корпусу, та фіксується штифтом через отвір 6. Аналогічним чином на осі нижньої рухомої траверси машини закріплюється корпус нижнього затискувача.

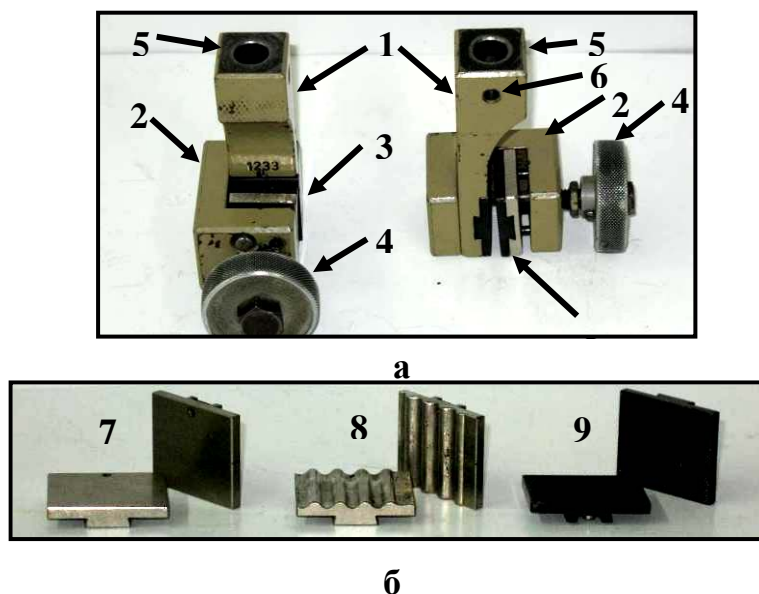


Рис. 1.4. Затискувачі для випробувань конструкційних пластмас на розтяг (а) та знімні затискні губки (б): 1 – корпуси затискувачів; 2 – затискні скоби; 3 – знімні губки; 4 – затискні гвинти; 5 – отвори для з'єднання з віссю динамометра; 6 – отвори для фіксуючих штифтів; 7, 8 – губки з гладкою поверхнею та гофрами; 9 – губки з рифленою поверхнею

До комплекту зазначених затискувачів входять 3 пари знімних сталевих губок (рис. 1.4б). Губки 7 з гладкою поверхнею та губки 8 з гофрами призначені для випробувань листових пластмас та плівкових матеріалів. Губки 9 з рифленою поверхнею застосовують при випробуваннях зразків жорстких пластмас переважно у вигляді двобічних лопаток за стандартом [38].

Загальний вигляд верхнього затискувача, закріпленого на динамометрі, та затискувачі з закріпленим зразком зображені на рис. 1.5.

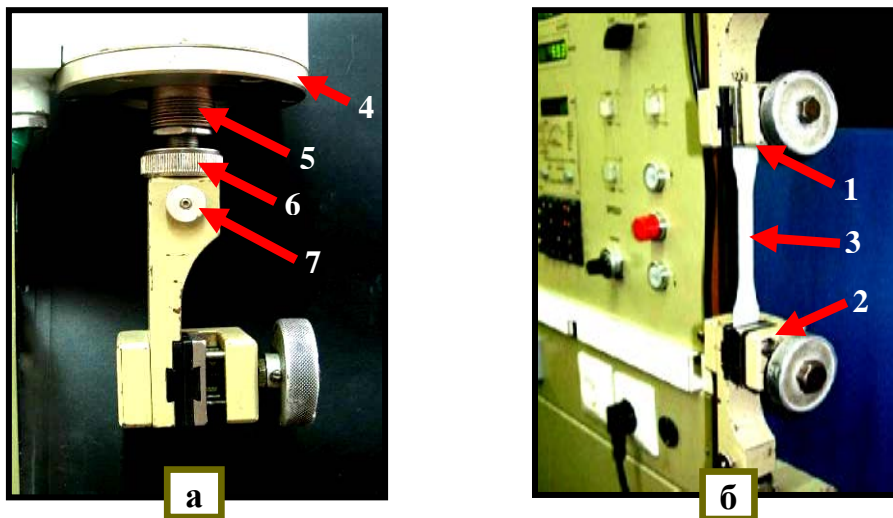


Рис. 1.5. Верхній затискувач з динамометром (а) та затискувачі для випробування пластмас на розтяг із закріпленим зразком (б): 1, 2 – верхній та нижній затискувачі; 3 – випробувальний зразок; 4 – динамометр; 5 – вісь динамометра; 6 – контргайка; 7 – фіксуєчий штифт

Затискувачі для випробувань зразків листових пластмас, полімерних плівок та гум. Загальний вигляд цих затискувачів зображений на рис. 1.6, 1.7. Затискувачі складаються з корпусів 1, затискних пластин 2, знімних губок 3 та затискних гвинтів 4.

Корпуси верхніх затискувачів закріплюються на осі динамометра, яка вставляється у отвори 5 корпусів, та фіксується штифтами через отвори 6. Аналогічним чином на осі нижньої рухомої траверси машини закріплюються корпуси нижніх затискувачів.

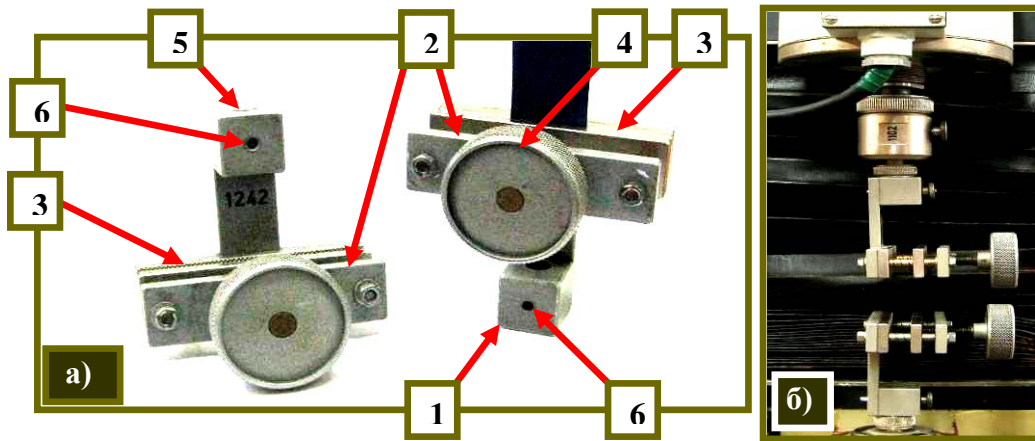


Рис. 1.6. Затискувачі №1242 для випробувань зразків полімерних плівок та гум (а) та затискувачі, закріплені на динамометрі і траверсі (б): 1 – корпуси затискувачів; 2 – затискні пластини; 3 – знімні губки; 4 – затискні гвинти; 5 – отвори для з'єднання з динамометром; 6 – отвори для фіксуєчих штифтів

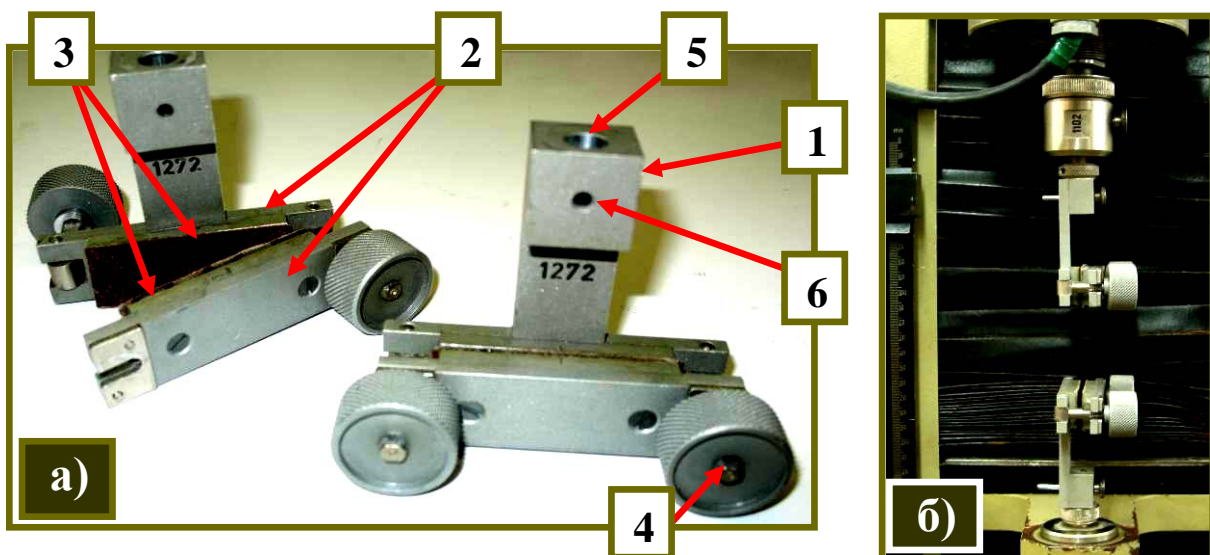


Рис. 1.7. Затискувачі для випробувань зразків полімерних плівок та гум (а) та затискувачі, закріплені на динамометрі траверсі (б): 1 – корпуси затискувачів; 2 – затискні пластини; 3 – знімні губки; 4 – затискні гвинти; 5 – отвори для з'єднання з динамометром; 6 – отвори для фіксуєчих штифтів

До комплекту зазначених затискувачів входять знімні сталеві та гумові губки. Губки з гладкою поверхнею та губки з гофрами призначені для випробувань листових та плівкових полімерів за стандартом [47]. Губки з рифленою

поверхнею застосовують при випробуваннях зразків гум переважно у вигляді двобічних лопаток за стандартом [33].

Загальний вигляд затискувачів, закріплених на динамометрі та на рухомій траверсі рис. 1.6б та рис. 1.7б.

Затискувачі для випробувань зразків полімерних плівок, ниток та волокон. Загальний вигляд цих затискувачів зображений на рис. 1.8.

Затискувачі складаються з корпусів 1 (рис. 1.8а), затискних пружин 2, поворотних елементів (пластин) 3 та затискних стрижнів 4. Зразок (смужка) листа або плівки розміщується між поверхнями корпусу 1 та затискного стрижня 4. Цей стрижень за допомогою пружин 2 та поворотних елементів 3 притискає зразок до робочої поверхні корпусу, яка розташована паралельно осі динамометра. Таким чином, тонкий зразок розтягується при навантаженні вздовж поздовжньою осі, а при зростанні зусилля розтягу одночасно зростає зусилля, з яким стрижень 4 притискає зразок до поверхні корпусу. В результаті цього підвищується надійність закріплення зразка у затискувачі.

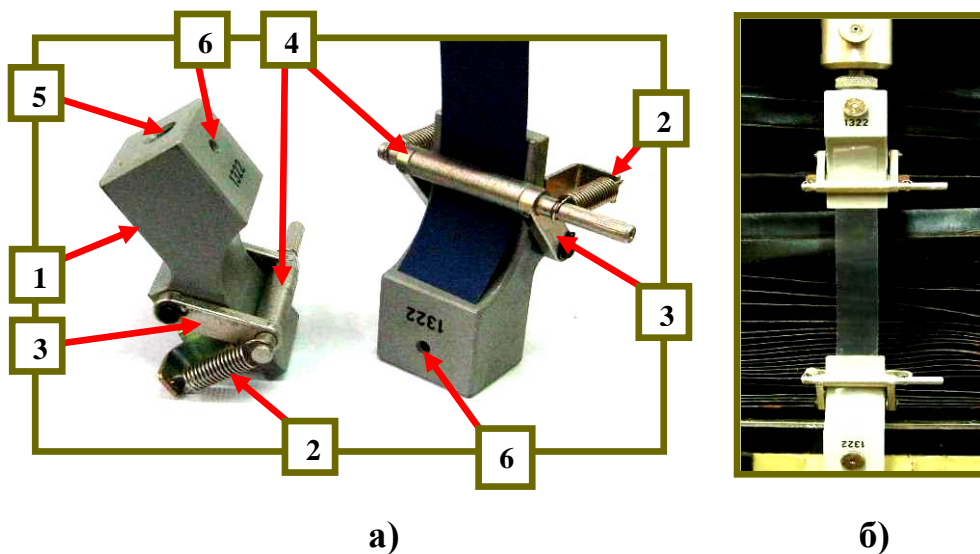


Рис. 1.8. Затискувачі для випробувань полімерних плівок, ниток та волокон (а) та затискувачі, закріплені на динамометрі і траверсі (б): 1 – корпуси затискувачів; 2 – пружини; 3 – поворотні елементи; 4 – затискний стрижень; 5 – отвори для з'єднання з динамометром; 6 – отвори для фіксуєчих штифтів

На рис. 1.8б зображено затискувачі разом із зразком полімерної плівки. Кріплення корпусів верхнього та нижнього затискувачів до динамометра та рухомої траверси здійснюється аналогічно вищеописаним типам затискувачів.

Затискувачі для випробувань зразків конструкційних пластмас, композиційних матеріалів та листових металів. Загальний вигляд цих затискувачів зображено на рис. 1.9.

Затискувачі складаються з корпусів 1, бокових пластин 2, що напрямляють затискні губки 3 під малим кутом до поздовжньої осі розтягу та затискних гвинтів 4. Під дією прикладеного до зразка осьового зусилля за рахунок взаємодії затискних губок з нахиленими площинами бокових пластин виникає додаткове зусилля у напрямку, перпендикулярному поздовжній осі зразка. Це зусилля збільшує початкове стисне навантаження на не робочу частину зразка поза активної зони і якість контакту зразка з затискувачем. Зростання осьового навантаження у процесі випробування на розтяг приводить до підвищення затискного зусилля губок та запобігає прослизанню зразка відносно затискувача.

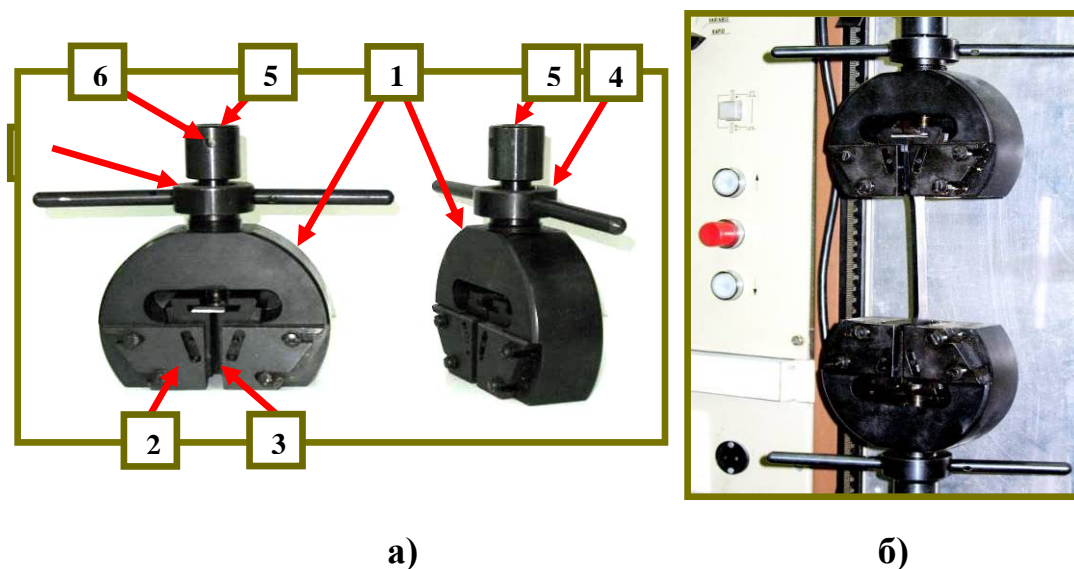


Рис. 1.9. Затискувачі для випробувань зразків конструкційних пластмас, композиційних матеріалів та листових металів (а) та затискувачі, закріплені на динамометрі і рухомій траверсі (б): 1 – корпуси затискувачів; 2 – бокові пластини; 3 – затискні губки; 4 – затискні гвинти; 5 – отвори для з'єднання з динамометром; 6 – отвори для фіксуючих штифтів.

Загальний вигляд затискувачів разом із зразком пластмаси, закріплених на динамометрі та на рухомій траверсі зображений на рис. 1.9б. Кріплення корпусів верхнього та нижнього затискувачів до динамометра та рухомої траверси здійснюється аналогічно вищеописаним типам затискувачів.

Деталі кріплення затискувачів. Для надійного прикріплення затискувачів до динамометрів та до рухомої траверси, а також для оперативної заміни затискувачів випробувальна машина TIRAtest-2151 укомплектована набором змінних елементів кріплення у вигляді кільцевих гайок, перехідних деталей та штифтів. Зазначені елементи зображено на рис. 1.10.

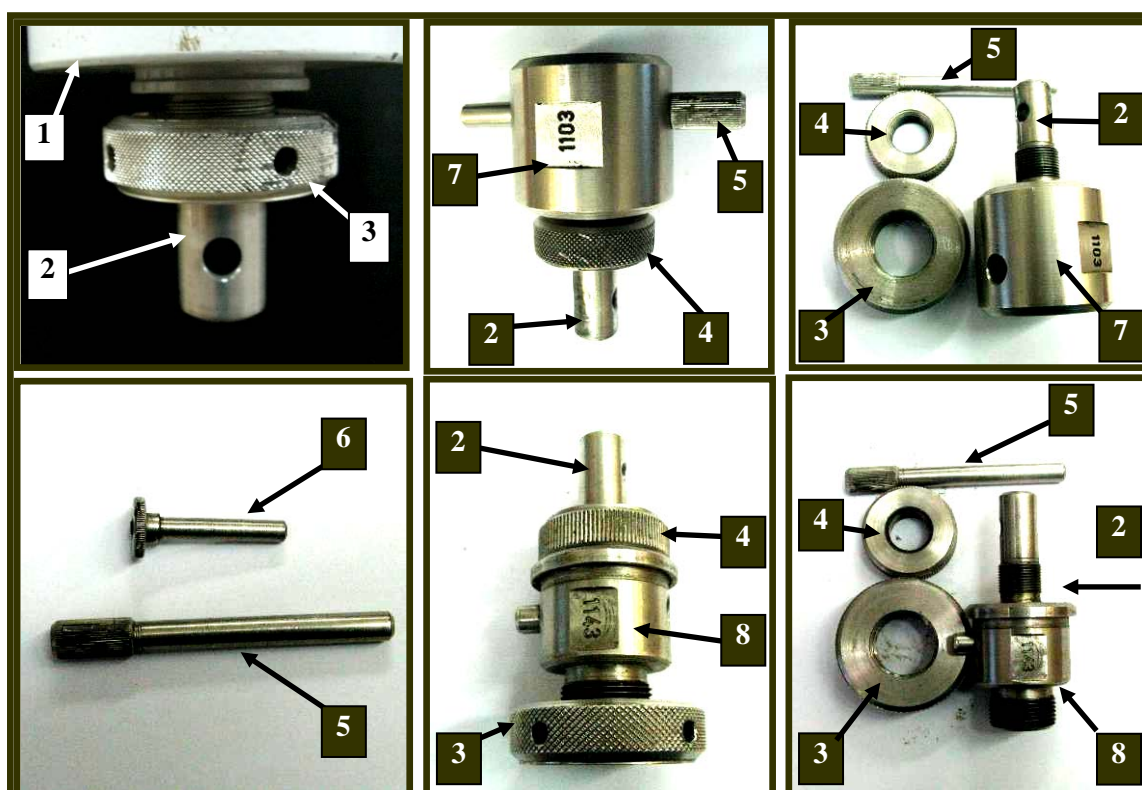


Рис. 1.10. Елементи кріплення для затискувачів: 1 – динамометр; 2 – вісі, що вставляються в корпуси затискувачів; 3, 4 – великі та малі гайки для фіксації затискувачів; 5, 6 – великі та малі штифти для фіксації затискувачів; 7 – елемент кріплення затискувача до динамометра; 8 – елемент кріплення затискувача до рухомої траверси

Осі 2 динамометрів 1 вставляються в поздовжні отвори верхніх затискувачів (поз.5 на рис 1.4–1.9), закріплюються штифтами 5 або 6 (рис. 1.10) і фіксу-

ються гайками 3 або 4 (в залежності від діаметра осей). Зазначені штифти вставляються в поперечні отвори корпусів затискувачів (поз. 6 на рис. 1.5–1.9) та у відповідні отвори на осях динамометрів.

Якщо діаметр поздовжнього отвору затискувача не збігається з діаметром осі динамометра, між затискувачем та динамометром встановлюються перехідні елементи 7.

Для прикріплення нижніх затискувачів до рухомої траверси випробувальної машини застосовуються перехідні елементи 8 (рис. 1.10), які фіксуються нижніми гайками 3 діаметром 24 мм.

Особливості вибору типу затискувача для випробувань певного типу зразків. Практика експлуатації універсальної випробувальної машини TIRAtest-2151 показала, що неможливо дати загальних та однозначних рекомендацій щодо вибору типів затискувачів для випробувань певних матеріалів. Це пов'язане з суттєвим розкидом властивостей міцності (від декількох одиниць МПа до десятків та сотень МПа) та жорсткості (від дуже м'яких еластомірів до композиційних матеріалів з модулем пружності у декілька тисяч МПа) випробовуваних матеріалів. Це також обумовлено значною різницею у товщині виробів, починаючи з дуже тонких (декілька мкм) плівок та закінчуючи монолітними зразками, що виготовлені способом лиття під тиском і мають товщину декілька міліметрів. Поведінка цих зразків у затискувачах (пошкодження у місці контакту, розрив у затискувачі або поруч з ним) залежить від правильності вибору типу затискувача.

З іншого боку, недостатнє затискування зразка може привести до його проковзування при випробуваннях та викривлення результатів.

Виключенням є тільки зразки у вигляді двобічних лопаток за стандартом [38], які рекомендується випробувати із застосуванням затискувачів, зображених на рис. 1.4, 1.5 та затискувача, що зображений на рис. 1.9. Випробування інших зразків починається, як правило, з попередніх (оціночних) дослідів, за результатами яких добирається оптимальний тип затискувача. Як зазначено

вище, основними критеріями вибору є: 1) відсутність пошкодження зразка за рахунок взаємодії із затискувачем (руйнування зразка виключно у робочій зоні); 2) якість утримання зразка у затискувачі без будь-якого проковзування у місці закріпленні.

Пристрої для випробувань зразків на стиск

Випробувальна машина TIRAtest-2151 оснащена набором шарнірних та жорстких платформ для випробувань матеріалів на стиск (рис. 1.11, 1.12). Верхні (шарнірні) платформи зображені на рис. 1.11а, б та на рис. 1.12 (поз.2). Вони закріплюються на осі динамометра 1 (рис. 1.12а) за допомогою штифтів 5 аналогічно затискувачам, що описані вище. Платформи 2 мають в середині кульовий шарнір, який дозволяє платформам встановлюватися у довільному положенні паралельно верхній площині зразка 3, що компенсує можливу непаралельність протилежних граней зразка-паралелепіпеда або протилежних торців зразка-циліндра.

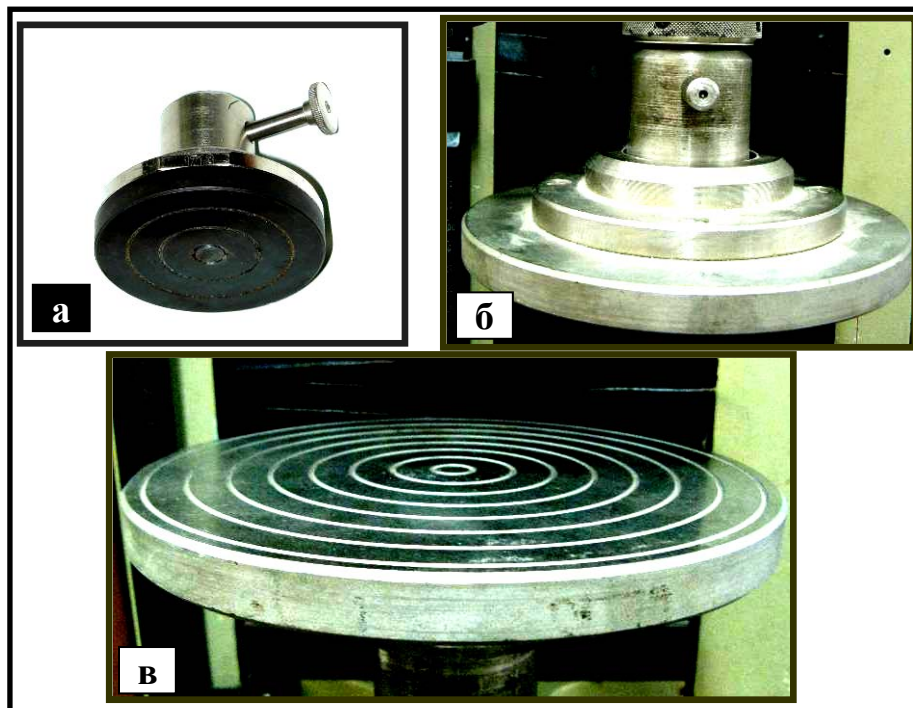


Рис. 1.11. Верхні шарнірні (а, б) та нижня (в) платформи для випробувань жорстких (а) та еластичних (б) матеріалів на стиск

Нижня (жорстка) платформа, що зображена на рис. 1.11в та на рис. 1.12 (поз.4), встановлюється безпосередньо на рухому траверсу 7 (рис. 1.1) випробувальної машини та при переміщенні траверси вгору деформує зразок.

На рис. 1.12б, та 1.12в зображені зразки пластмас, розміщені між верхніми та нижніми опорами, під час випробувань на стиск. При встановлюванні зразків між платформами необхідно звертати увагу перш за все на те, щоб поздовжня вісь зразка якомога точніше збігалася з геометричними центрами платформ. Це необхідно для того, щоб навантаження при стисканні здійснювалося вздовж поздовжньої осі зразка й при цьому в ньому не виникало б додаткових згинальних напружень.

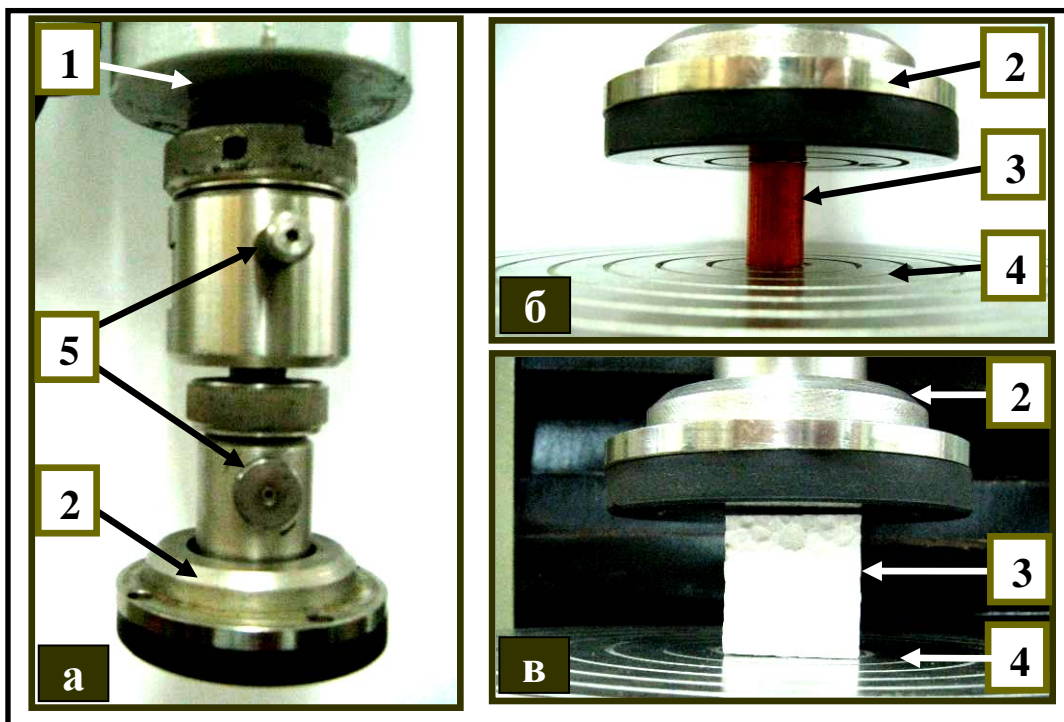


Рис. 1.12. Верхня шарнірна платформа (а), закріплена на динамометрі, зразки з жорсткого (б) та еластичного (в) матеріалів під час випробування на стиск: 1 – динамометр; 2 – верхні платформи; 3 – зразок 4 – нижня платформа; 5 – штифти для фіксації верхньої платформи

В цілому, проведення випробувань на стиск потребує з боку оператора набагато менше часу на етапі підготовки експерименту та при самому випробуванні, ніж при випробуванні на розтяг. З іншого боку, при проведенні випробувань на стиск має місце суттєво менша точність вимірювання деформацій за ра-

хунок застосування набагато коротших зразків (для запобігання втраті стійкості), ніж на розтяг.

Пристрої для випробувань зразків на згин

Випробування на згин зразків конструкційних пластмас, металів та інших матеріалів проводяться з застосуванням комплекту пристроїв, що зображені на рис. 1.13, 1.14.

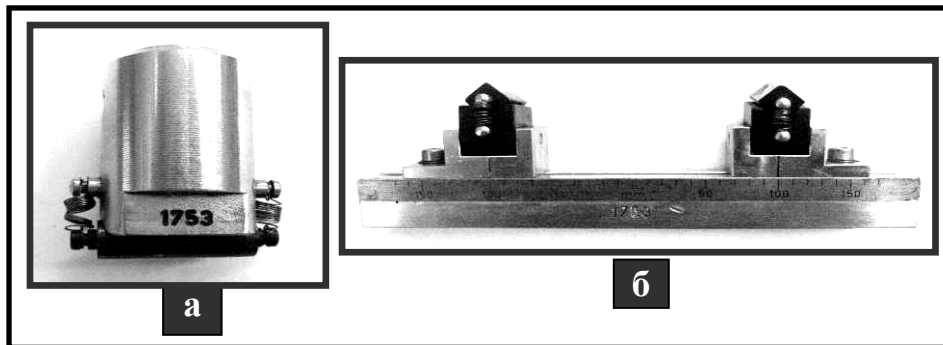


Рис. 1.13. Верхній навантажувальний елемент (а) та пристрій для згинання (б) для випробувань матеріалів на згин

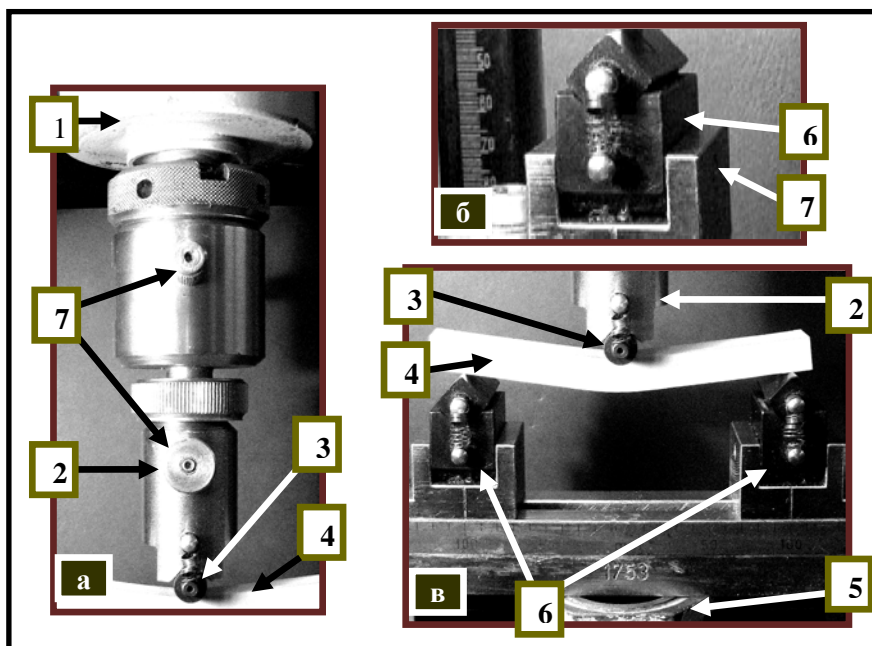


Рис. 1.14. Верхній навантажувальний елемент (а), опора (б) та пристрій для згинання (в) для випробувань матеріалів на згин: 1 – динамометр; 2 – верхній навантажувальний елемент; 3 – поперечний стрижень; 4 – зразок; 5 – рухома траверса; 6 – нижні опори; 7 – штифти для фіксації верхньої платформи

Верхній навантажувальний елемент – індентор окремо зображений на рис. 1.13а. Він закріплюється на осі динамометра 1 (рис. 1.14а) за допомогою штифтів 7 аналогічно затискувачам, описаним вище. Цей елемент з'єднаний з поперечним стрижнем 3 (рис. 1.14) діаметром 10 мм, який при переміщенні вгору пристрою для згинання (рис. 1.13б) натискає на зразок 4 (рис. 1.14) та створює згинальне навантаження. Зазначений пристрій встановлений на рухомій траверсі 5 випробувальної машини.

Опори 6 пристрою для згинання мають можливість вільно обертатися навколо осей 7, що дозволяє їм встановлюватися у довільному положенні паралельно нижньої площині зразка 4. Це компенсує можливу непаралельність нижньої та верхньої площин зразка.

При випробуваннях на згин поперечний стрижень 3 можна замінювати на стрижень з іншим діаметром. Радіуси закруглення опор 6 шляхом їх обертання на 90° навколо поздовжньої осі можна змінювати від 0,5 мм до 2,0 мм.

На рис. 1.14б та 1.14в зображені зразки пластмас у вигляді брусків, що розміщені між верхнім навантажувальним елементом та нижніми опорами, під час випробувань на згин. При встановлюванні зразків на опори необхідно слідкувати, щоб поздовжня вісь зразка була розташована паралельно довжині пристрою для згинання, а сам зразок лежав посередині нижніх опор. Це необхідно для того, щоб момент сил при згині діяв у головній площині зразка, створюючи у зразку плоский згин.

Випробування зразків матеріалів на згин мають певні переваги перед випробуваннями на розтяг та стиск. Це, в першу чергу, відносно великі величини переміщень й, у зв'язку з цим, більша загальна точність вимірювання. У той же час при випробуваннях на згин має місце неоднорідний напружений стан зразка й одержані характеристики матеріалу можуть використовуватися лише в пружній області за умови виконання закону Гука. Випробування на згин можливо розцінювати лише як якісні або порівняльні.

1.1.4. Керування режимами випробування

Пульт керування випробувальною машиною

Пульт керування (поз.1 на рис 1.2) універсальної випробувальної машини TIRAtest детально зображений на рис. 1.15.

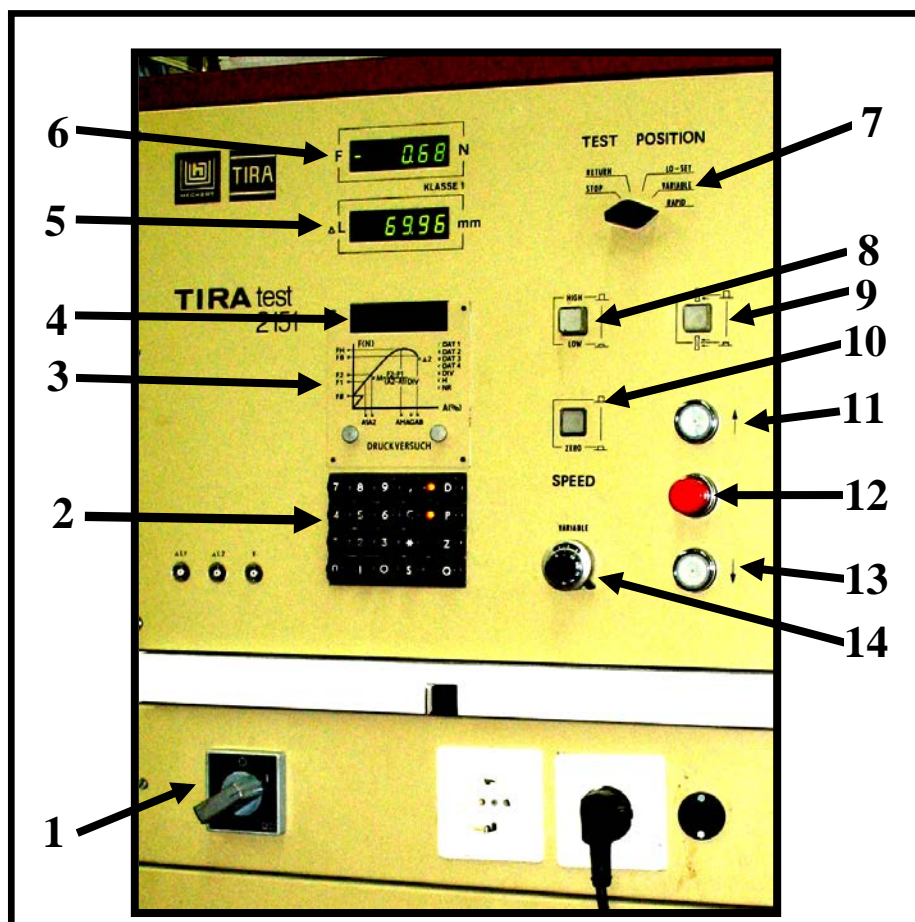


Рис. 1.15 – Пульт керування випробувальною машиною TIRAtest-2151: 1 – ручка для вмикання та вимикання випробувальної машини; 2 – клавіатура вводу даних; 3 – програмний шаблон; 4 – табло індикації даних вводу та виводу; 5 – табло індикації деформації ΔL ; 6 – табло індикації сили P ; 7 – перемикач режиму роботи; 8 – клавіша зниження швидкості переміщення рухомого затискувача у 40 разів (при натиснутій клавіші); 9 – клавіша підключення екстензометра; 10 – клавіша ZERO (тимчасова зупинка роботи машини); 11, 13 – клавіші переміщення рухомого затискувача вгору або вниз відповідно; 12 – клавіша зупинки роботи машини; 14 – ручка регулювання швидкості.

Ручкою 1 здійснюється загальне вмикання та вимикання машини. Клавіатура 2 призначена для вводу даних, необхідних для роботи, для виводу даних, що накопичуються у процесорі під час випробувань, та для керування протоколами випробувань.

За допомогою програмних шаблонів 3, що вибираються у залежності від конкретних цілей випробувань, задаються ті або інші режими роботи машини. Інформація про значення величин, що вводяться у мікропроцесор або утворюються у процесі випробування, поступає на табло індикації даних 4.

На два табло індикації сили 6 та переміщення 5 безперервно поступає інформація про силу P , що прикладена до динамометра (поз.3 на рис. 1.1).

Перемикачем 7 (рис. 1.15) встановлюються необхідні режими роботи машини, як описано нижче. Натискання клавіші 8 ("**HIGH - LOW**") зменшує швидкість переміщення рухомої траверси 7 (рис. 1.1) у 40 разів (при натиснутій клавіші) у порівнянні зі швидкістю, що встановлена ручкою регулювання швидкості 14 (рис. 1.15).

Клавіша 9 керує (у разі необхідності) роботою екстензометрів, що можуть бути підключені до випробувальної машини. Клавішею 10 можна здійснити тимчасову зупинку роботи випробувальної машини із зберіганням усіх введених даних та даних, що знаходяться у мікропроцесорі на даний час. Після відтиснення цієї клавіші робота машини продовжиться.

За допомогою клавіш (кнопок) 11, 12 та 13 здійснюється керування переміщенням робочої траверси ("вгору", "стоп", "вниз" відповідно) та починається (клавіші 11, 12) або припиняється (клавіша 12) в автоматичному режимі.

Регулювання швидкості переміщення рухомої траверси. Швидкість деформування зразків під час випробувань встановлюють за допомогою регулятора 14 (рис. 1.16), що знаходиться на пульті керування та зображений на рис. 1.15. Регулятор має дві шкали відліку швидкостей переміщення рухомої траверси: внутрішня шкала з ціною поділки 1 мм/хв (шкала 2 на рис. 1.16) та зовнішня шкала з ціною поділки 100 мм/хв (шкала 3).

Таким чином, для встановлення швидкості деформування (швидкості переміщення рухомого затискувача) необхідно провести такі дії:

- представити значення швидкості у вигляді $V = 100 \cdot A + B$ (мм/хв.);
- проти відлікової риски, що нанесена на корпусі регулятора, шляхом обертання ручки 1 розташувати на зовнішній шкалі значення A ;
- таким же чином розташувати на внутрішній шкалі значення B .

Наприклад, необхідна швидкість $V = 250$ мм/хв. ($A = 2, B = 50$). На зовнішній шкалі встановлюємо значення "2", на внутрішній шкалі – значення "50".

Як зазначалося вище, при натисканні клавіші 8 (рис. 1.15) швидкість переміщення, що встановлена регулятором, зменшується у 40 разів.

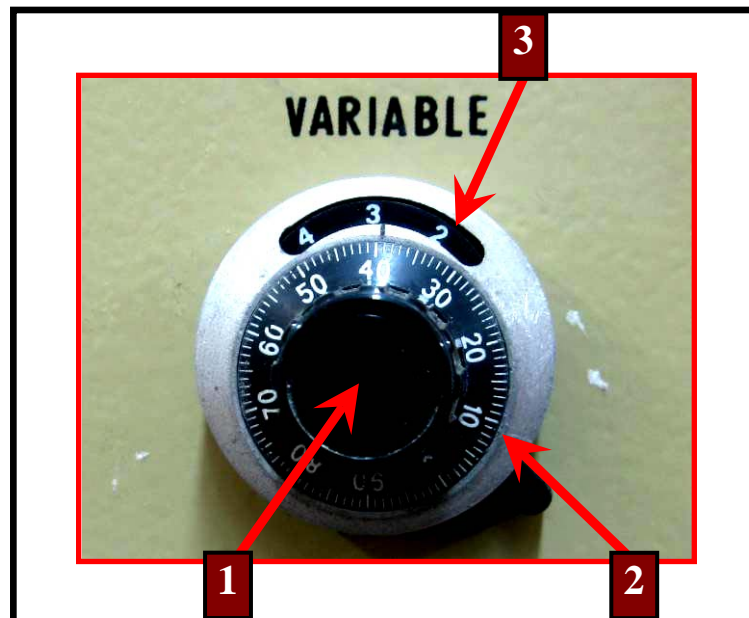


Рис. 1.16 – Регулятор швидкості переміщення рухомої траверси випробувальної машини TIRAtest-2151: 1– ручка регулятора; 2 – шкала з ціною поділки 1 мм/хв; 3 – шкала з ціною поділки 100 мм/хв.

Перемикач режимів роботи випробувальної машини.

Режими роботи машини встановлюються перемикачем (поз.7 на рис. 1.15), що знаходиться на пульті керування та зображений на рис. 1.17.

При розташуванні ручки перемикача 1 у лівому положенні (положення «TEST») робота машини відбувається в автоматичних режимах, що здійснюються за допомогою мікропроцесора:

– режим «**TEST-STOP**» (поз. 2 на рис. 1.17): після закінчення роботи активний затискувач зупиняється і повертається у вихідне положення лише після натискання клавіш переміщення рухомого затискувача вгору або вниз (поз.11 або 13 на рис. 1.15);

– режим «**TEST-RETURN**» (поз. 3 на рис. 1.17): після закінчення випробування (наприклад, руйнування зразка) активний затискувач автоматично повертається у вихідне положення з наступним записом діаграми деформування та (або) протоколу випробування.

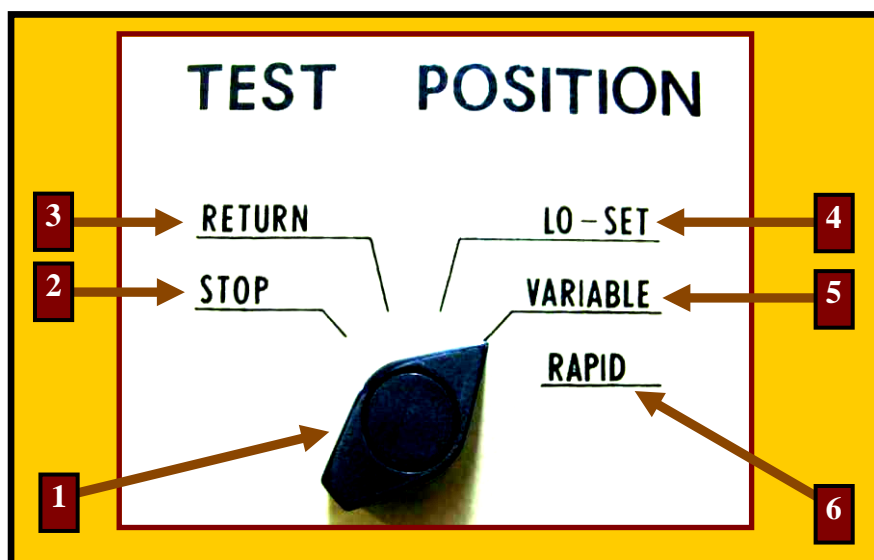


Рис. 1.17. Перемикач режимів роботи машини TIRAtest-2151: 1 – ручка перемикача; 2 – положення (режим) "TEST-STOP"; 3 – положення "TEST-RETURN"; 4 – положення " POSITION-L0-SET"; 5 – положення "POSITION-VARIABLE"; 6 – положення "POSITION-RAPID"

При розташуванні ручки перемикача 1 у правому положенні (положення «POSITION») робота машини відбувається у мануальних режимах, які здійснюються оператором:

– режим «**POSITION-L0-SET**» (поз. 4) – встановлення рухомого затискувача на задану відстань від нерухомого (її потрібно попередньо задати при загальному вводі даних);

– режим «**POSITION-VARIABLE**» (поз. 5) – переміщення рухомої траверси із заданою швидкістю (швидкість можливо змінювати у процесі переміщення траверси регулятором (рис. 1.16);

– режим «**POSITION-RAPID**» (поз. 6) – переміщення траверси з максимальною швидкістю (прискорене встановлення рухомого затискувача).

Клавіатура вводу даних у пам'ять процесора

Дані у мікропроцесор випробувальної машини вводяться за допомогою клавіатури (поз. 2 на рис. 1.15), що знаходиться на пульті керування та зображена на рис. 1.18.

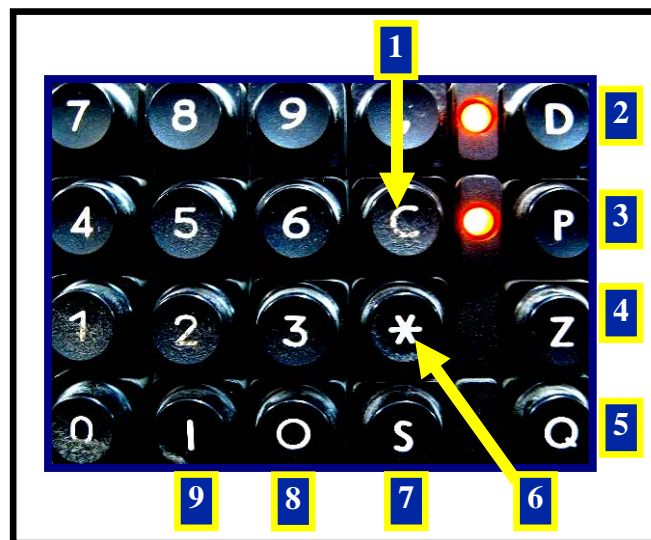


Рис. 1.18 – Клавіатура вводу даних випробувальної машини TIRAtest: 1 – анулювання неправильно введених даних; 2 – включення та виключення друку діаграми; 3 – включення та виключення друку протоколу; 4 – друкування сертифіката випробування; 5 – анулювання недійсного випробування; 6 – введення та друкування даних; 7 – виділення тих характеристик, для яких потрібно провести статистичну обробку; 8 – клавіша "OUTPUT" (виведення даних); 9 – клавіша "INPUT" (введення даних)

Клавіатура вводу даних містить такі клавіші:

«0»...«9» – клавіші вводу чисел; « , » – десяткова кома;

С (поз. 1 на рис. 1.18) – клавіша анулювання неправильно введених даних;

D (поз. 2) – клавіша включення та виключення друку діаграми (якщо індикатор поблизу клавіші світиться, то діаграму буде надруковано);

P (поз. 3) – включення та виключення друку протоколу (якщо індикатор поблизу клавіші світиться, то протокол буде надруковано);

Z (поз. 4) – друкування сертифіката випробування (результатів статистичної обробки);

Q (поз. 5) – анулювання недійсного випробування (наприклад, зразок вислизнув із затискувача);

« * » (поз. 6) - команда введення даних та їх друкування (подається після набору даних у режимі «**INPUT**» та їх індикації на табло 4, рис. 1.15);

I (поз. 9) – клавіша «**INPUT**» (введення даних);

O (поз. 8) – клавіша «**OUTPUT**» (виведення даних);

S (поз. 7) – клавіша виділення тих характеристик, для яких потрібно провести статистичну обробку (кількість характеристик для статистичної обробки – не більше 3).

Функції програмних шаблонів задання режиму випробувань

Програмні шаблони дають можливість здійснювати різні режими навантаження та деформування зразків. Для вводу вхідних даних слід виконати такі дії:

1. Відповідний шаблон встановлюється на пульті керування (поз. 3 на рис. 1.15) та активізується натисканням клавіші введення даних «**I**» (поз. 9 на рис. 1.18).

2. Після натискання клавіші «**I**» на шаблоні загорається зелений індикатор напроти параметра, значення якого потрібно ввести за допомогою клавіатури вводу даних у вигляді набору цифр від 0 до 9 (у разі потреби використовується кома).

3. Після набору даних, їх індикації на табло 4 (рис. 1.15) та перевірки правильності введення натискається клавіша « * » (поз. 6 на рис. 1.18) і дані надходять у мікропроцесор.

4. У разі помилки при введенні, дані видаляються натисканням клавіші «С» (поз. 1 на рис. 1.18) та вводяться повторно.

5. Після вводу автоматично відбувається перехід до наступного параметра.

Короткий порядок введення даних:

«I» → введення числа → «*» → друкування.

Невірно введені дані анулюються натисненням клавіші «С».

Програма «Druckersuch» (випробування на розтяг-стиск)

Програмний шаблон «Druckersuch» для вводу даних у процесор випробувальної машини TIRAtest-2151 та параметри, що вводять та одержують за його допомогою, зображені на рис. 1.19 та 1.21. Цей шаблон дає можливість випробувати зразки на розтяг та стиск із заданою швидкістю деформування, проводити розрахунок механічних характеристик зразків та друкувати діаграми деформування і протоколи випробувань.

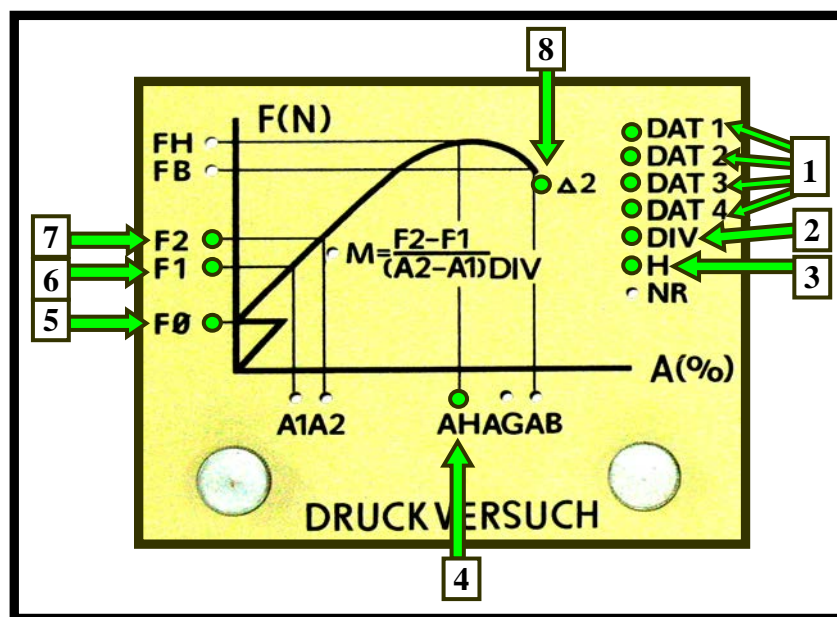


Рис. 1.19 – Вхідні дані програмного шаблону «Druckersuch»: 1 – довільні числа; 2 – площа поперечного перерізу зразка; 3 – робоча довжина (висота) зразка; 4 – гранична відносна деформація; 5 – початкова сила; 6, 7 – значення сил для визначення модуля пружності; 8 – спад сили.

Введення даних (режим «INPUT», рис. 1.19):

DAT1 ... DAT4 (поз. 1) – довільні числа (дата проведення випробування, № випробовуваного зразка, № випробування та інше);

DIV (поз. 2) – площа поперечного перерізу зразка, мм²;

H (поз. 3) – робоча довжина зразка, мм;

AG (поз. 4) – гранична відносна деформація, при досягненні якої деформування зразка припиняється, %;

F0 (поз. 5) – сила, з якої починає записуватися діаграма деформування, Н;

F1, F2 (поз. 6, 7) – значення сил для визначення модуля пружності, Н;

Δ2 (поз. 8) – спад сили (Н) для розпізнання процесором моменту розриву зразка.

Виведення даних (режим «OUTPUT», рис. 1.20):

NR (поз.1) – номер випробування;

AB (поз. 2) – деформація (%), що відповідає силі FB;

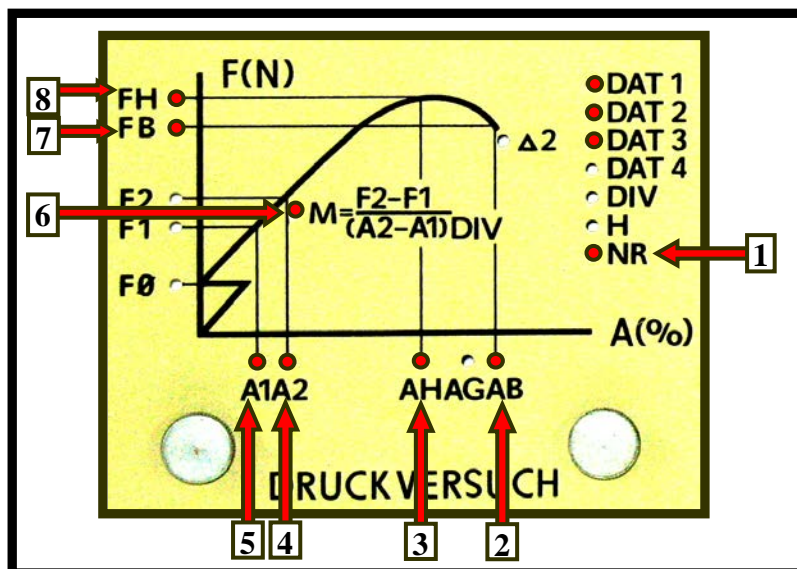


Рис. 1.20. Вихідні дані програмного шаблону «DRUCKERSUCH»:
1 – номер випробування; 2, 3 – деформації, що відповідають силам F_B та F_H ; 4, 5 – деформації, що відповідають силам F_2 та F_1 ; 6 – модуль пружності; 7 – сила при розриві; 8 – максимальна сила.

AH (поз. 3) – деформація (%), що відповідає силі F_H ;

A1, A2 (поз. 4 та 5) – деформації (%), що відповідають силам **F1** та **F2**;

M (поз. 6) – модуль пружності (МПа), який обчислюється за формулою: $M = (F2 - F1) / [(A2 - A1) \cdot DIV]$;

FВ (поз. 7) – сила при розриві, Н; **FН** (поз. 8) – максимальна сила, Н.

Ці дані виводяться на папір разом з протоколом або на табло 4 (рис. 1.20) при натисненні клавіші «O».

Програма «Zyklische Belastung 1» (циклічне навантаження)

Програмний шаблон «Zyklische Belastung 1» для вводу даних у процесор випробувальної машини **TIRAtest-2151** та параметри, що вводять та одержують за його допомогою, зображені на рис. 1.21 та 1.22. За допомогою цього програмного шаблону можливо здійснювати запис кривих повзучості в циклічному та статичному режимах навантаження.

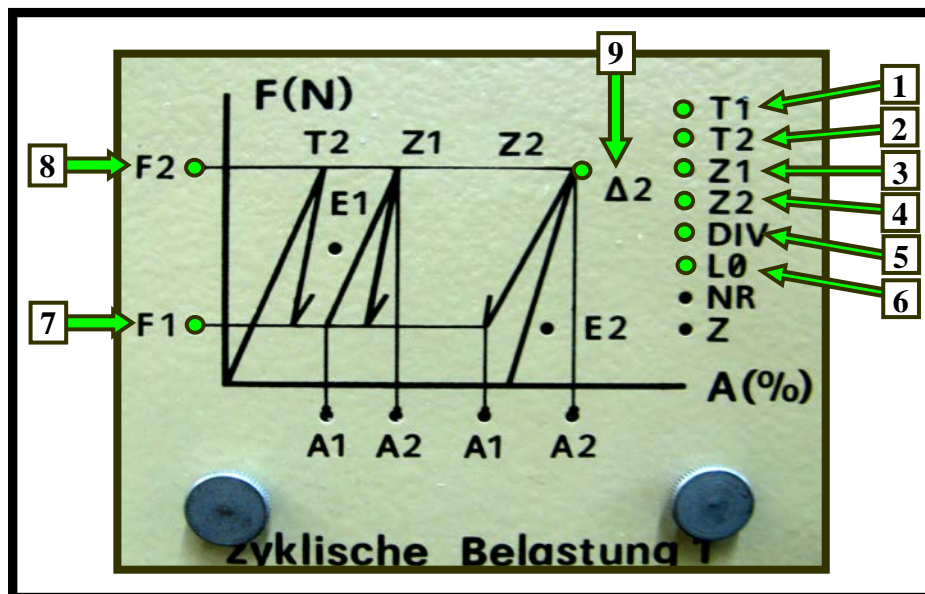


Рис. 1.21. Вхідні дані програмного шаблону «Zyklische Belastung 1»: 1, 2 – часи витримки зразка при мінімальному та максимальному навантаженнях $F1$ та $F2$; 3 – число циклів, при якому визначається модуль пружності $E1$; 4 – загальне число циклів, після досягнення якого випробування припиняється; 5 – площа поперечного перерізу зразка; 6 – робоча довжина зразка; 7, 8 – значення мінімального та максимального навантаження; 9 – спад сили для розпізнання процесором моменту розриву зразка

Цикл навантаження складається з:

- розтягу зразка з постійною швидкістю до заданого максимального навантаження F_2 ;
- витримки зразка під постійним навантаженням F_2 протягом T_2 ;
- розвантаження зразка до заданого мінімального навантаження F_1 ;
- витримки зразка під постійним навантаженням F_1 протягом T_1 .

Далі цикли повторюються. Значення видовжень зразків зчитують з таблиці індикації деформації 5 (рис. 1.15).

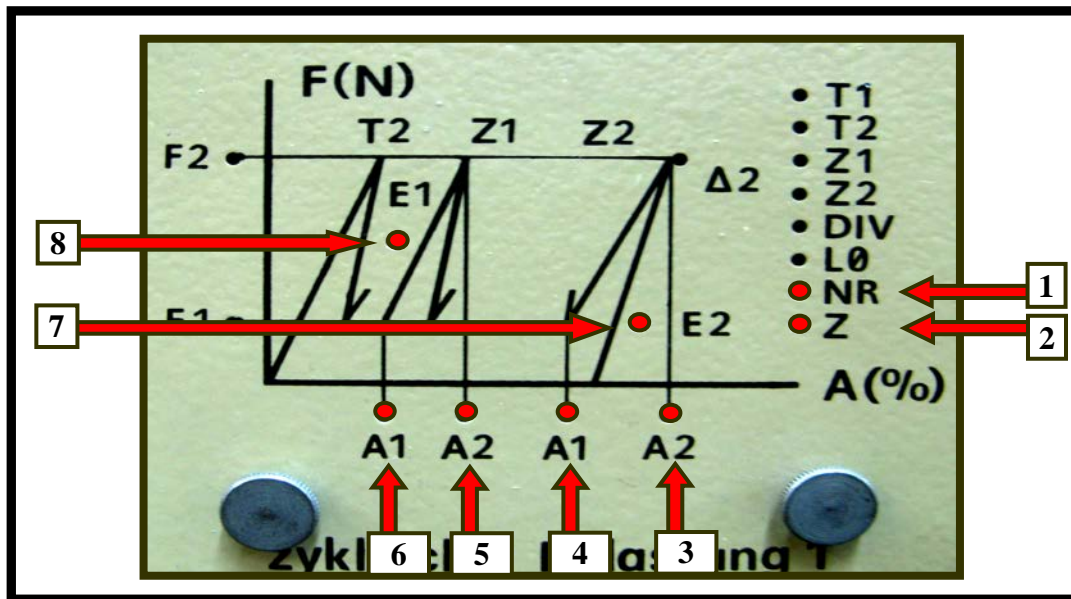


Рис. 1.22. Вихідні дані програмного шаблону "Zyklische Belastung 1":
1 – номер випробування; 2 – загальне число циклів навантаження;
3, 4 – деформації при навантаженнях F_2 та F_1 і числі циклів Z_2 ;
5, 6 – деформації при навантаженнях F_2 та F_1 і числі циклів Z_1 ;
7 – сила при розриві; 8 – максимальна сила

Введення даних (режим «INPUT», рис. 1.21):

- T_1 (поз. 1) – час витримки під мінімальним навантаженням F_1 , с;
- T_2 (поз. 2) – час витримки під максимальним навантаженням F_2 , с;
- Z_1 (поз. 3) – число циклів, за якого визначається модуль пружності E_1 ;
- Z_2 (поз. 4) – загальне число циклів, після досягнення якого випробування припиняється (максимальне число циклів не більше 64000);

- DIV** (поз. 5) – площа поперечного перерізу зразка, мм^2 ;
L0 (поз. 6) – робоча довжина зразка, мм ;
F1 (поз.7) – значення мінімального навантаження, H ;
F2 (поз. 8) – значення максимального навантаження, H ;
 $\Delta 2$ (поз. 9) – спад сили для розпізнання моменту розриву зразка, H .

Виведення даних (режим «OUTPUT», рис. 1.22):

- NR** (поз. 1) – номер випробування;
Z (поз. 2) – загальне число проведених циклів;
A1 (поз. 6) – деформація при навантаженні $F1$ і числі циклів $Z1$, %;
A2 (поз. 5) – деформація при навантаженні $F2$ і числі циклів $Z1$, %;
A1 (поз. 4) – деформація при навантаженні $F1$ і числі циклів $Z2$, %;
A2 (поз. 3) – деформація при навантаженні $F2$ і числі циклів $Z2$, %;
E1 (поз. 8) – модуль пружності матеріалу при числі циклів $Z1$, МПа ;
E2 (поз. 7) – модуль пружності матеріалу при числі циклів $Z2$, МПа .

Ці дані виводяться на папір разом з протоколом або на табло 4 (рис. 1.15) при натисненні клавіші «O».

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

Дії оператора при роботі з випробувальною машиною

Загальний порядок роботи

У табл. 1.4 наведена послідовність дій при роботі з випробувальною машиною у різних режимах (розтяг, стиск, згин та циклічне навантаження).

Після закінчення випробування повертаємо затискувачі у вихідне положення (клавіша 11, рис. 1.15 після випробування на розтяг або клавіша 13 після випробування на стиск та згин).

Пристрій для друкування (рис. 1.1, поз. 2) здійснює виведення на папір діаграми деформування.

Таблиця 1.4. Порядок роботи при випробуваннях на розтяг і стиск

№ п/п	Дія оператора	Розділи, де описано дію	Рисунки (позиції), що зображують керований елемент
1	Увімкнути випробувальну машину	1.1.2	1.1 (1)
2	Встановити потрібну швидкість переміщення траверси	1.1.2 1.1.4	1.15 (14) 1.16
3	Встановити потрібний програмний шаблон	1.1.2 1.1.4	1.15 (3) 1.19 – 1.22
4	За допомогою клавіатури ввести вхідні дані	1.1.2 1.1.4	1.15 (2) 1.18
5	Встановити робочу відстань між затискувачами у режимі "POSITION-LO-SET"	1.1.4	1.15 (7) 1.17 (4)
6	Закріпити зразок у затискувачах	1.1.3	1.1 (4, 5, 6) 1.4 – 1.9
7	Почати випробування	на розтяг	1.15 (13)
		на стиск або згин	1.15 (11)

Опис сертифікату випробувань

На рис. 1.23 зображено типову діаграму деформування полімерного матеріалу при розтязі. Разом з діаграмою наведено сертифікат випробування, що друкується випробувальною машиною після переведення затискувачів у вихідне положення.

Дані, що були введені: **DAT1, DAT2, DAT3, DAT4** – довільні числа; **DIV** – площа поперечного перерізу зразка; **H** – робоча довжина зразка; **F0** – початкова сила, за якої починається записування діаграми деформування; **F1, F2** – значення сил для визначення модуля пружності; **AG** – гранична відносна деформація, при досягненні якої деформування зразка припиняється; **Δ2** – спад сили для розпізнання процесором моменту розриву зразка.

Дані, що отримано в результаті випробувань: **NR** – номер випробування; **RB** – напруження при розриві; **RH** – максимальне напруження; **A1, A2** – дефо-

рмації, що відповідають силам **F1** та **F2**; **AB** – деформація, що відповідає силі **FB**; **AH** – деформація, що відповідає силі **FH**; **M** – модуль пружності.

Наприклад, перед випробуванням вхідні дані мають такі значення:

DAT1 = 31, DAT2 = 05, DAT3 = 2016 – випробування було проведене 31 травня 2016 року; **DAT4 = 1** – № зразка 1;

DIV = 15.0 mm² – площа поперечного перерізу зразка;

H = 100 mm - робоча довжина зразка;

F0 = 10 N – початкова сила запису діаграми деформування;

F1 = 100 N, F2 = 200 – значення сили для визначення модуля пружності;

AG = 200% – гранична відносна деформація для припинення розтягу;

Δ2 = 200 N – спад сили для розпізнання розриву зразка.

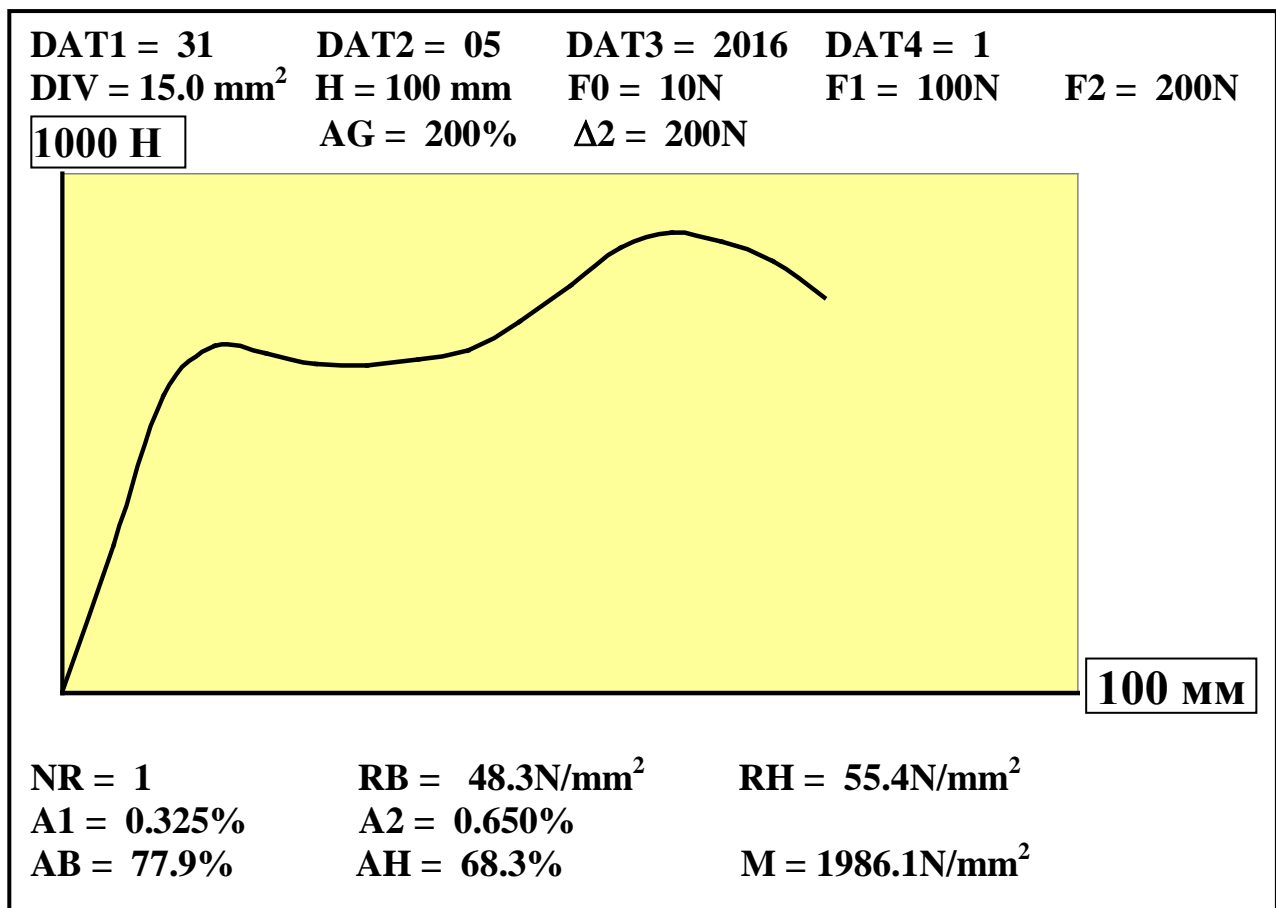


Рис. 1.23. Діаграма деформування та сертифікат випробування

За результатами випробування отримані такі дані:

NR = 1 – номер випробування;

RB = 48,3 N/mm² – напруження при розриві;

RH = 55,4 N/mm² – максимальне напруження;

A1 = 0,0703 %, **A2 = 0,4821 %** – деформації, що відповідають введеним значенням сил F1 та F2;

AB = 77,9 % – деформація, що відповідає значенню сили при розриві;

AH = 68,3 % – деформація, що відповідає максимальному значенню сили;

M = 1986,1 N/mm² – модуль пружності.

1.2. Випробування на міцність за розтягу, стиску та згину

1.2.1. Випробування матеріалів на розтяг. Побудова та обробка діаграм деформування. Характеристики міцності і пружності

1.2.1.1. Вимоги до зразків

Для випробувань за стандартом [38] застосовують зразки типів 1-3, форма і розміри яких вказана на рис. 1.24-1.26 і в табл. 1.5. У випадку відпрацювання рецептури матеріалу, режимів переробки та при науково-дослідних роботах допускається використовувати зразки типу 4 і 5, вказані на рис. 1.27, 1.28 і в табл. 1.6.

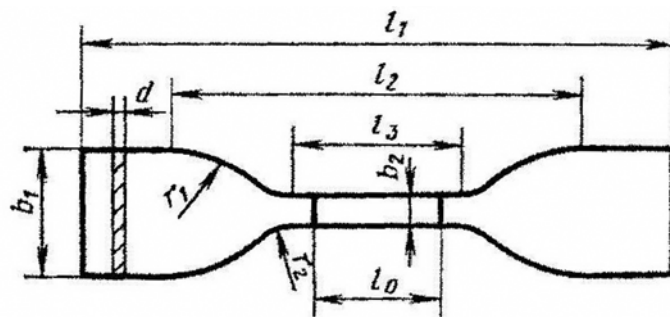


Рис. 1.24. Зразок типу 1 з пластмаси для випробування на розтяг

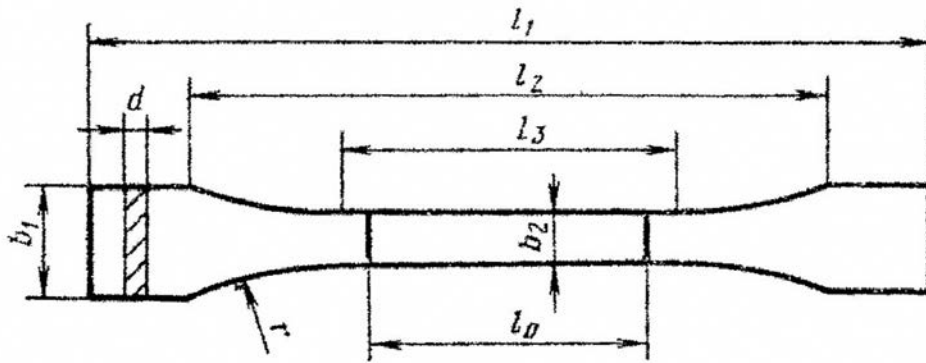


Рис. 1.25. Зразок типу 2 з пластмаси для випробування на розтяг

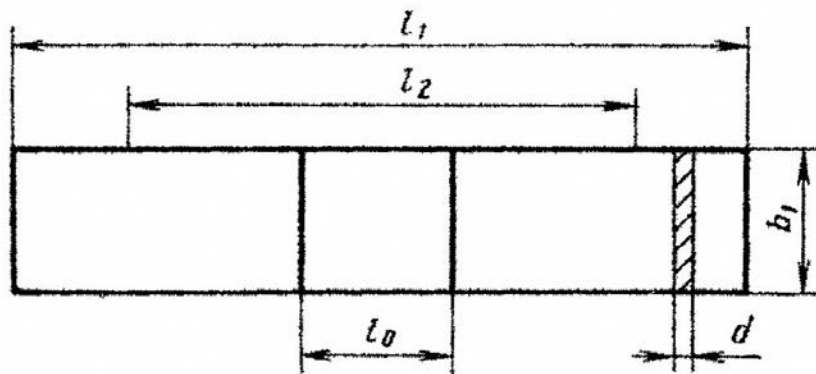


Рис. 1.26. Зразок типу 3 з пластмаси для випробування на розтяг

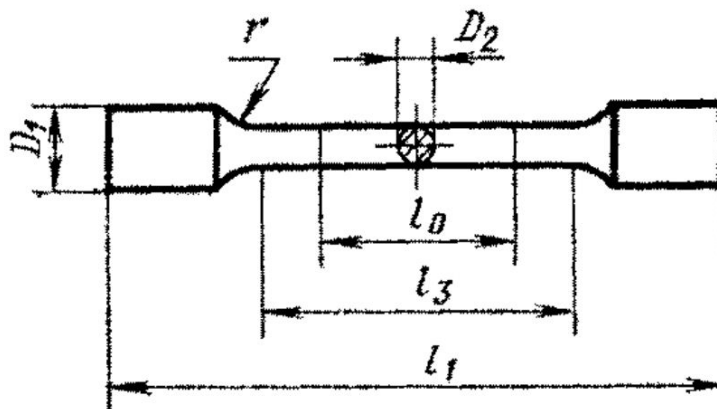


Рис. 1.27. Зразок типу 4 з пластмаси для випробування на розтяг

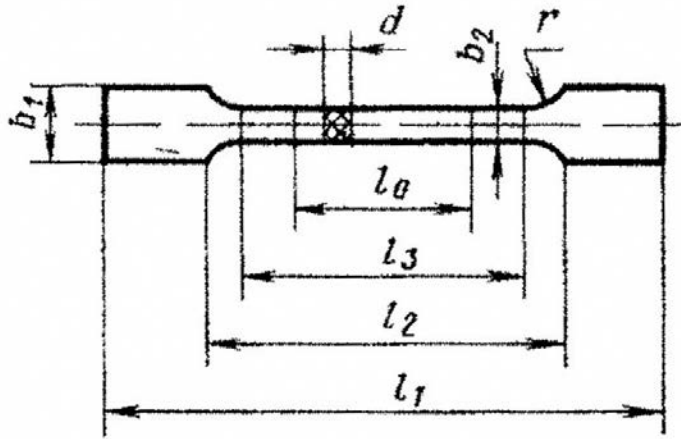


Рис. 1.28. Зразок типу 5 з пластмаси для випробування на розтяг

Таблиця 1.5. Розміри зразків типів 1, 2 та 3 (мм) для випробування на розтяг

Параметр	Тип зразка		
	1	2	3
Загальна довжина l_1 , не менше	115	150	250
Відстань між мітками, що визначають положення країв затискувачів на зразку l_2	80 ± 5	115 ± 5	170 ± 5
Довжина робочої частини l_3	33 ± 1	$60 \pm 0,5$	–
Розрахункова довжина l_0	25 ± 1	$50 \pm 0,5$	50 ± 1
Ширина головки b_1	25 ± 1	$20 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
Ширина робочої частини b_2	$6 \pm 0,4$	$10 \pm 0,5$	–
Товщина d	$2 \pm 0,2$ (від 1 до 3)	$4 \pm 0,4$ (від 1 до 10)	$2 \pm 0,2$ (від 1 до 6)
Більший радіус закруглення r_1	25 ± 1	–	–
Менший радіус закруглення r_2	$14 \pm 0,5$	–	–
Радіус закруглення r , не менше	–	60	–

Примітка. Допускається застосування зразків типу 2 і 3 товщиною менше 1 мм при виготовленні їх з листових матеріалів та зразків типу 2 товщиною 3 мм при виготовленні їх з наповнених полімерних матеріалів.

Таблиця 1.6. Розміри зразків типів 4 та 5 (мм) для випробування на розтяг

Параметр	Тип зразка	
	4	5
Загальна довжина l_1 , не менше	80	250
Ширина головки b_1	–	$11 \pm 0,2$
Довжина робочої частини l_3	$40 \pm 0,5$	$40 \pm 0,5$
Ширина робочої частини b_2	–	$5 \pm 0,2$
Радіус закруглення r	$6 \pm 0,2$	$6 \pm 0,2$
Відстань між мітками, що визначають положення країв за-тискувачів на зразку l_2	–	52 ± 1
Товщина робочої частини d	–	1–4
Розрахункова довжина l_0	$25 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
Діаметр головки D_1	$11 \pm 0,2$	–
Діаметр робочої частини D_2	$5 \pm 0,2$	–

Тип, спосіб та режим виготовлення, відбір проб повинен відповідати нормативно-технічній документації на матеріали. Якщо такі вказівки відсутні, зразки вибирають у відповідності з рекомендаціями, що надані в табл. 1.7.

Таблиця 1.7. Розміри зразків типів 4 та 5 (мм) для випробування на розтяг

Матеріал	Тип зразка	Спосіб виготовлення	Швидкість випробування, мм / хв
Еластичні термопласти, екструзійні та литні компаунди (поліетилен, пластифікований полівінілхлорид та інші).	1	Пресування, екструзія, литво під тиском	100 200 (250) 500
Тверді, литні термопласти, включаючи наповнені та армовані компаунди, термореактивні екструзійні маси, включаючи різні види промислових та декоративних ламінантів.	2	Литво під тиском. Пресування за ГОСТ 12019-66. Механічна обробка за ГОСТ 26277-84.	1 2 5 10 20 (25) 50 100
Термореактивні пластмаси і смоли, що наповнені неорганічними матеріалами, наприклад волокнами, матами, тканинами. Підсилені термопластичні матеріали у вигляді плит, пластин.	3	Пресування за ГОСТ 12015-66. Механічна обробка за ГОСТ 26277-84	2 5 10

Примітка. Пластичний матеріал вважається твердим, модуль якого вище 700 МПа при випробуваннях згин або вище 1000 МПа при випробуваннях на розтяг

При руйнуванні зразка типу 3 в зоні затискувачів його кінці слід посилити у відповідності з рис. 1.29, використовуючи накладки довжиною не менше 50 мм, товщиною (d_1) від 3 до 10 мм. Діаметр (D) центрових отворів для штифтів $3^{+0.25}_{-0.005}$ мм.

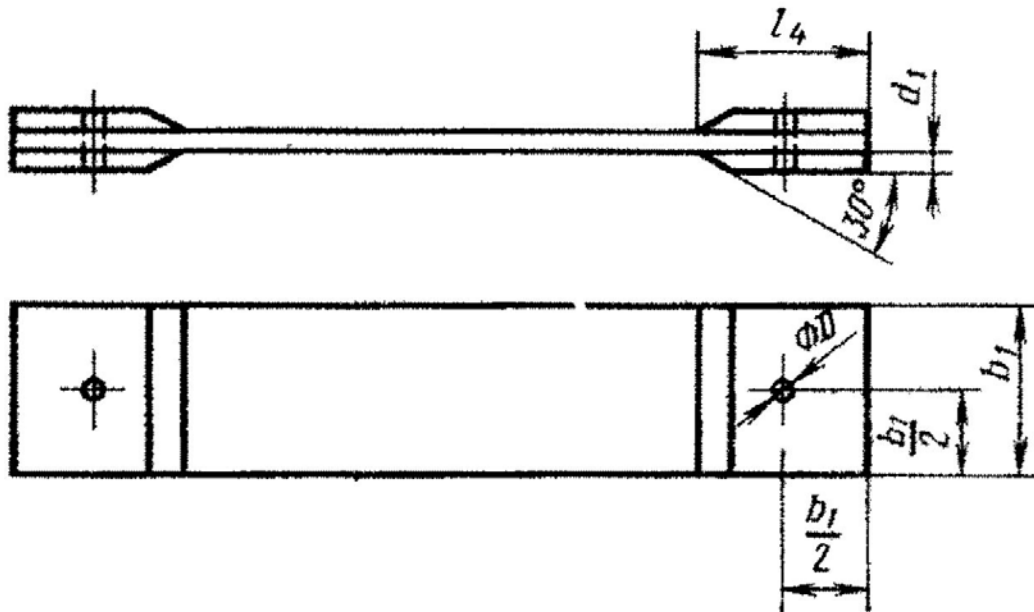


Рис. 1.29. Розміщення накладок для випробувань зразків типу 3

Допускається застосовувати для посилення зразка типу 3 кінцеві накладки завдовжки не менше 70 мм без центрових отворів. Накладки приклеюють до вирізаного зразка або отримують в процесі виготовлення листа, призначеного для вирізки зразків, у вигляді потовщень. Матеріал накладок має бути ідентичним матеріалу зразка або зі значенням модуля пружності нижчим, ніж у випробовуваного матеріалу.

Матеріал накладок і методика їх приклеювання мають відповідати нормативно-технічній документації на матеріал.

При виготовленні зразків механічною обробкою з виробів і напівфабрикатів, у тому числі з листів і пластин, максимально допустима товщина має бути 3

мм для зразків типу 1, відповідати товщині виробу або напівфабрикату, але не більше 10 мм для зразка типу 2.

При виготовленні зразка типу 2 з плити або виробів, товщина яких більше 10 мм, механічною обробкою її доводять до 10 мм. Обробку до необхідної товщини здійснюють з двох сторін в поздовжньому напрямі зразка, якщо в нормативно-технічній документації на матеріал немає інших вказівок.

Зразки повинні мати гладку рівну поверхню, без здуттів, сколов, тріщин, раковин і інших видимих дефектів.

Для випробування ізотропних матеріалів використовують не менше п'яти зразків, для випробування анізотропних матеріалів не менше п'яти зразків, відібраних в місцях і напрямках, які повинні відповідати нормативно-технічній документації на матеріал.

Зразки кондиціонують не менше 16 год. по 44 при температурі $(296 \pm 2) \text{K}$ ($(23 \pm 2)^\circ \text{C}$) і відносній вологості $(50 \pm 5) \%$, якщо в нормативно-технічній документації на матеріал немає інших вказівок.

Час від закінчення виготовлення формованих зразків до їх випробування повинен складати не менше 16 год., включаючи і час на їх кондиціонування.

При виготовленні зразків з напівфабрикатів або виробів час від закінчення формування напівфабрикатів або виробів до початку випробувань зразків з них повинен складати не менше 16 год., включаючи і час на їх кондиціонування, якщо в нормативно-технічній документації на матеріал немає інших вказівок.

1.2.1.2. Вимоги до апаратури

Випробування проводять на машині, яка при розтяганні зразка повинна забезпечувати вимір навантаження з погрішністю не більше 1% від вимірюваної величини і постійну швидкість розходження затискувачів в необхідних межах.

Затискувачі машини повинні забезпечувати надійне кріплення зразків і збіг подовжньої осі зразка з напрямом розтягування і не повинні викликати руйнувань зразків в місці кріплення.

Прилад для виміру видовження в процесі випробування повинен мати похибку виміру не більше 1%, якщо в нормативно-технічній документації на матеріал немає інших вказівок.

1.2.1.3. Проведення випробувань

Перед випробуванням на зразки наносять необхідні мітки відповідно до табл. 1.5, 1.6 і рис. 1.24 - 1.28. Мітки не повинні погіршувати якість зразків або викликати розрив зразків в місцях міток.

Товщину і ширину зразків вимірюють в трьох місцях, в середині і на відстані 5 мм від міток. З отриманих значень обчислюють середні арифметичні величини, за якими обчислюють початковий поперечний переріз F_0 .

Зразки, в яких мінімальне і максимальне значення товщини або ширини розрізняються більш ніж на 0.2 мм, не випробовують.

Зразки закріплюють в затискувачі випробувальної машини по мітках, що визначають положення крайок затискувачів так, щоб подовжні осі затискувачів і вісь зразка збігалися між собою і напрямом руху затискувача. Затискувачі рівномірно затягують, щоб виключалося ковзання зразка в процесі випробування, але при цьому не відбувалося його руйнування в місці закріплення.

Випробування проводять при температурі $(296 \pm 2) \text{K}$ ($(23 \pm 2)^\circ \text{C}$) і відносній вологості $(50 \pm 5) \%$, якщо в нормативно-технічній документації на матеріал немає інших вказівок.

Випробування проводять при швидкості розходження затискувачів випробувальної машини, передбаченої в нормативно-технічній документації на матеріал, яка повинна відповідати одній з вказаних в табл. 2. При цьому вибирають максимальну з приведених в табл. 1.8 швидкість так, щоб час від моменту прикладення навантаження до зразка до його руйнування складав не менше 1 хв. при випробуванні матеріалів, що мають границю текучості, і не менше 30 с для матеріалів, що не мають границі текучості.

Таблиця 1.8. Рекомендовані швидкості руху затискувача та допустимі погрішності

Швидкість, мм / хв	Допустима похибка, мм/хв
2 (2.5)	± 0.4
5	± 1.0
10	± 1.0
20 (25)	± 2.0
50	± 5.0
100	± 10.0
200 (250)	± 20.0
500	± 50.0

При випробуванні вимірюють навантаження і видовження зразка безперервно або у момент досягнення границі текучості, максимального навантаження, і навантаження у момент руйнування зразка. При записі кривої «навантаження - видовження» визначають характеристики відповідно до рис. 1.30.

Допускається визначати видовження зразка за зміною відстані між затискувачами, якщо це передбачено в нормативно-технічній документації на матеріал.

Зразки, які в процесі випробування руйнуються за межами робочої частини (l_0), або у яких в процесі випробування виявлені дефекти (пухирі, чужорідні для матеріалу включення, внутрішні тріщини і тому подібне), не враховують.

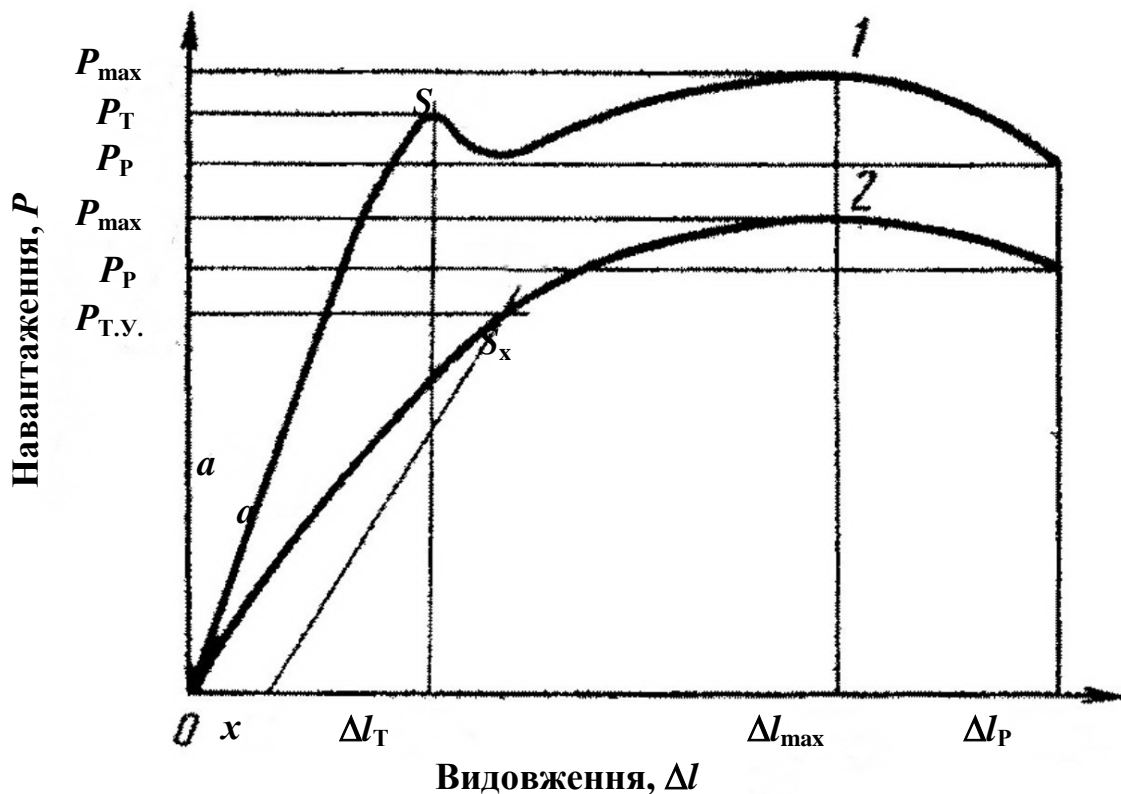


Рис. 1.30. Діаграми розтягу полімерних матеріалів та їх обробка за [38]: 1 – матеріал має границю текучості; 2 – матеріал не має границі текучості; *a* – прямолінійні ділянки на початку кривої «навантаження - видовження»; *S* – границя текучості; *x* – відрізок на осі видовження для визначення умовної границі текучості; *S_x* – умовна границя текучості

У випадках застосування стандарту в договірно-правових і торговельних стосунках в рамках економічного співробітництва не враховують зразки, які в процесі випробування руйнуються за межами розрахункової довжини (l_0) або у яких в процесі випробування виявлені дефекти (пухирі, чужорідні для матеріалу включення, внутрішні тріщини і тому подібне).

Для зразків, що подовжуються з утворенням шийки, слід враховувати також результати, отримані на зразках, у яких шийка поширилася за межі робочої частини зразка, але руйнування його сталося не в місці кріплення в затискувачі.

В протокол випробувань записують такі дані:

l_0 - початкова розрахункова довжина зразка;

F_0 - площа початкового поперечного перерізу зразка;

P_{\max} - найбільше навантаження при випробуванні;

P_p - навантаження в момент руйнування зразка;

P_T - навантаження при досягненні границі текучості;

$P_{T.y.}$ - навантаження при досягненні умовної границі текучості (див. **рис.**

1.30);

Δl_{\max} - зміна розрахункової довжини зразка в момент досягнення максимального навантаження;

Δl_p - зміна розрахункової довжини зразка в момент руйнування;

Δl_T - зміна розрахункової довжини зразка в момент досягнення точки текучості;

$\Delta l_{T.y.}$ - зміна розрахункової довжини зразка в момент досягнення точки умовної текучості.

1.2.1.4. Обробка результатів

Значення напружень (σ) в МПа (Н/мм^2) обчислюють за формулами:

міцність за розтягу

$$\sigma_{\max} = P_{\max} / F_0;$$

міцність при розриві

$$\sigma = P_p / F_0;$$

границя текучості за розтягу

$$\sigma_T = P_T / F_0 ;$$

умовна границя текучості

$$\sigma_{T.y.} = P_{T.y.} / F_0.$$

Значення відносних видовжень (ϵ) у відсотках обчислюють за формулами:

відносне видовження при максимальному навантаженні

$$\epsilon_{\max} = (\Delta l_{\max} / l_0) \cdot 100\% ;$$

відносне видовження при розриві

$$\varepsilon_p = (\Delta l_p / l_0) \cdot 100\% ;$$

відносне видовження при границі текучості

$$\varepsilon_T = (\Delta l_T / l_0) \cdot 100\% ;$$

відносне видовження при умовній границі текучості

$$\varepsilon_{T.Y.} = (\Delta l_{T.Y.} / l_0) \cdot 100\% .$$

За результат випробування приймають середнє арифметичне не менше п'яти визначень, закруглене до двох значущих цифр.

Для кожного показника обчислюють величину стандартного відхилення за [48] з точністю, передбаченою для обчислення середнього арифметичного, якщо в нормативно-технічній документації на матеріал немає інших вказівок.

Результати випробування записують в протокол, який окрім загальних даних (р. 7), має містити такі дані:

- тип використаних зразків з вказаними їх шириною і товщиною в межах розрахункової довжини l_0 ;
- тип випробувальної машини і приладу вимірювання видовження;
- швидкість випробування;
- місце і напрям вирізання зразків з анізотропних пластмас.

1.2.2. Випробування матеріалів на стиск

1.2.2.1. Вимоги до зразків

Зразки для випробування [34] повинні мати форму прямокутної призми, прямого циліндра або прямої трубки. Опорні площини зразка мають бути перпендикулярні напрямку прикладення навантаження при стисканні і паралельними між собою в межах 0,1% від висоти зразка.

Висоту зразків (h) в міліметрах розраховують в залежності від відношення коефіцієнту гнучкості до найменшого радіуса інерції за формулами:

- для прямокутної призми з квадратною або прямокутною основою:

$$h = i \cdot \lambda = \frac{\lambda}{3,46} a;$$

або

$$h = i \cdot \lambda = \frac{\lambda}{3,46} a;$$

- для прямого циліндра:

$$h = i \cdot \lambda = \frac{\lambda}{4} d;$$

- для прямої трубки з основою у вигляді циліндричного вінця:

$$h = i \cdot \lambda = \frac{\lambda}{4} \sqrt{D^2 + d_1^2};$$

де λ - коефіцієнт гнучкості;

i - мінімальний радіус інерції площі основи, мм;

a - сторона квадратної основи призми, мм;

b - менша сторона основи прямокутної призми з прямокутною основою, мм;

d - діаметр прямого циліндра, мм;

d_1 - внутрішній діаметр трубки, мм;

D - зовнішній діаметр трубки, мм.

Коефіцієнт гнучкості зразка має дорівнювати 10, якщо в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію нема інших вказівок. В тих випадках, коли в процесі випробування зразок втрачає стійкість, коефіцієнт гнучкості зменшують до 6.

Висоту зразка встановлюють від 10 до 40 мм. Переважна висота зразка 30 мм.

Для випробувань на стиск армованих пластмасових плит використовують зразки у вигляді прямокутної призми з прямокутною основою з такими розмірами:

- ширина a – $(25 \pm 0,5)$ мм;
- товщина b – від 2 до 6 мм;
- початкова висота h_0 – відповідно до табл. 1.9.

Таблиця 1.9. Початкова висота (h_0) та відстані між затискувачами (h_v) зразків з армованих пластиків

Товщина зразка, b	Висота зразка, h_0	Відстань між затискувачами по висоті зразка, h_v
Від 2 до 3	35 ₋₁	11 ₋₁
Вище 3 до 4	40 ₋₁	16 ₋₁
Вище 4 до 5	45 ₋₂	21 ₋₂
Вище 5 до 6	50 ₋₂	26 ₋₂

Для випробування зразки з армованих пластмас закріплюють в пристосування, показаному на рис. 1.31.

Режим та метод виготовлення зразків вказують в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію. Зразки повинні мати чисту, гладку, рівну поверхню без здуттів, сколов, тріщин, раковин та інших видимих дефектів.

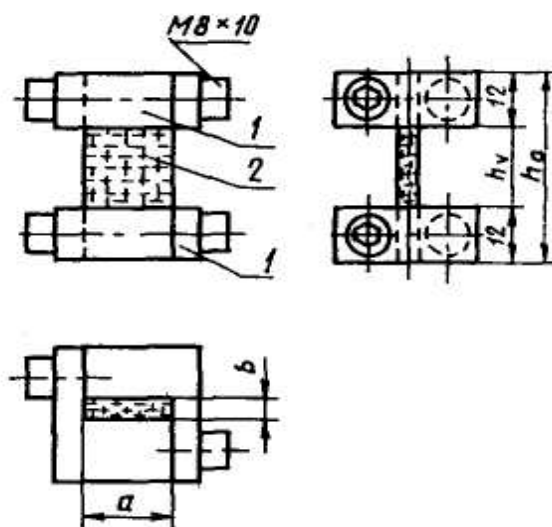


Рис. 1.31. Схема закріплення зразка: 1 – пристрій для закріплення зразка; 2 – зразок

Число зразків для випробування для ізотропних пластмас – не менше п'яти, для анізотропних – не менше 10 (не менше п'яти для кожної осі анізотропії).

1.2.2.2. Вимоги до апаратури

Машина для випробувань на стиск має забезпечувати вимірювання навантаження з похибкою не більше 1%. Вимірювач навантаження має бути практично безінерційним. Випробувальна машина має бути споряджена двома плоско паралельними площадками, одна з яких самостійно встановлюється. Швидкість зближення площадок має бути постійною.

Прилад для вимірювання деформації заміряє відстані між опорними площадками або між мітками, які нанесені на зразок, з похибкою, не більшою ніж 1%. Рекомендується використовувати прилади, які автоматично фіксують виміри відстані між площадками або мітками на зразку.

Прилад для вимірювання геометричних розмірів зразка повинен мати похибку не більше 0.01 мм.

Схема закріплення зразків з армованих пластмас показана на рис. 1.32. Кріплення здійснюється таким чином, щоб поверхні зразка 2 і контактні поверхні пристосування 1 повністю збігалися.

1.2.2.3. Підготовка та проведення випробувань

Перед випробуванням зразки кондиціонують, згідно з вимогами [44], не менше 16 годин при температурі $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості $(50\pm 5)\%$, якщо в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію немає інших вказівок.

Висоту, ширину, товщину або діаметр зразка вимірюють з похибкою, не більшою ніж 0,01 мм, і не менше ніж в трьох місцях. За мінімальними значеннями розраховують поперечний перетин зразка.

Швидкість випробування вказують в нормативно-технічній документації. Якщо така вказівка відсутня, то швидкість випробування V (мм/хв) розраховують, в залежності від висоти зразка, за формулою:

$$V = 0,03 \frac{h}{t},$$

де h - висота зразка, мм; t – стала, яка дорівнює 1 хв.

Швидкість випробування може змінюватись в межах $\pm 50\%$ від розрахованого значення.

Випробування проводять при температурі $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ і відносній вологості $(50 \pm 5)\%$, якщо в нормативно технічній документації на конкретну продукцію нема інших вказівок.

Встановлюють зразок між опорними площадками, так щоб вертикальна вісь зразка збігалася з напрямком дії навантаження. Регулюють машину до досягнення контакту між зразком і площадкою.

Встановлюють обрану швидкість зближення опорних площадок. Машину приводять в дію і записують значення показників, що визначаються, або криву «навантаження - деформація» при стисканні.

1.2.2.4. Обробка результатів.

Руйнівне напруження при стисканні (σ_p), напруження стиску на границі текучості (σ_T), напруження стиску на умовної границі текучості (σ_{Ty}) і напруження стиску при встановленій умовній деформації ($\sigma_{сд}$) в МПа розраховують за формулою

$$\sigma = \frac{P}{F},$$

де P – навантаження, що відповідають зазначеним точкам діаграми деформування;

F – площа мінімального початкового перетину зразка, мм^2 .

За результат випробувань приймають середнє арифметичне усїх паралельних визначень, розраховане до другої значущої цифри.

Відносну деформацію стиску при руйнуванні і відносну деформацію стиску на границі текучості розраховують у відсотках за формулою

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100\% ,$$

де Δh - зменшення висоти зразка в момент руйнування або на границі текучості, мм; h_0 - початкова висота зразка, мм.

За результат випробувань приймають середнє арифметичне усїх паралельних визначень, розраховане до другої значущої цифри.

Стандартне відхилення (S) обчислюють за [48], якщо в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію немає інших вказівок.

Результати випробувань записують в протокол, який, окрім загальних даних (р. 7), повинен містити:

- мінімальний радіус інерції та коефіцієнт гнучкості зразків;
- підтвердження відсутності втрати стійкості зразків;
- спосіб виміру деформації;
- швидкість випробування.

1.2.3. Випробування матеріалів на згин

Нижчеописаний метод [35] поширюється на неармовані і армовані пластмаси і встановлює спосіб випробування на статичний вигин. Метод не поширюється на комірчасті пластмаси.

Суть методу полягає в тому, що зразок для випробувань, який вільно лежить на двох опорах, короткочасно навантажують посередині між опорами.

При цьому визначають такі показники:

- згинальне напруження і значення прогину у момент руйнування;
- згинальне напруження при заданому значенні прогину для пластмас, що не руйнуються при згині;

- згинальне напруження при максимальному навантаженні.

1.2.3.1. Вимоги до зразків

Стандартний зразок має такі розміри:

- довжина (l) – не менше 80 мм;
- ширина (b) – $(10,00 \pm 0,50)$ мм;
- товщина (h) – $(4,00 \pm 0,20)$ мм.

Якщо неможливо виготовити зразок з указаними розмірами, допускається застосовувати зразки, співвідношення довжини і товщини яких має складати $l \geq 20h$, ширина зразка має бути від 10 до 25 мм, а для матеріалів, що містять великі частки наповнювача, – від 20 до 50 мм

Розміри зразків для жорстких неармованих та армованих пластмас вказані в табл. 1.10.

Зразки виготовляють формуванням або механічною обробкою. При виготовленні зразків з плит завтовшки більше 10 мм плиту зрізують до товщини 10 мм тільки з одного боку. Спосіб, режим виготовлення і розміри зразків мають бути вказані в нормативно-технічній документації на матеріал.

Таблиця 1.10. Розміри зразків (мм) для жорстких неармованих та армованих пластмас

Жорсткі неармовані пластмаси		Армовані пластмаси	
Товщина, h	Ширина, $b \pm 0,50$	Товщина, h	Ширина, $b \pm 0,50$
від 1 до 3 включно	25,00	від 1 до 10 включно	15,00
від 3 до 5 включно	10,00		
від 5 до 10 включно	15,00		
від 10 до 20 включно	20,00	від 10 до 20 включно	30,00
від 20 до 35 включно	35,00	від 20 до 35 включно	50,00
від 35 до 50 включно	50,00	від 35 до 50 включно	80,00

При випробуванні анізотропних матеріалів зразки вирізують так, щоб згинальне напруження при випробуванні зразка було прикладена в тому ж напрямі, що і при експлуатації виробів з цих матеріалів. Місце і напрям вирізки зразків з готових виробів мають забезпечувати отримання стандартних зразків. При цьому слід враховувати, що розташування шарів або орієнтація в матеріалі можуть робити значний вплив на результати випробування, особливо для шаруватих пластмас. Розташування зразків, що вирізуються з листів анізотропних матеріалів, вказане на рис. 1.32.

Зразки повинні мати гладку рівну поверхню без здуттів, сколів, тріщин, раковин та інших видимих дефектів.

Число зразків для випробування вказують в нормативно-технічній документації на матеріал. За відсутності таких вказівок випробовують п'ять зразків, а для анізотропних матеріалів по п'яти зразків для кожного з головних напрямів.

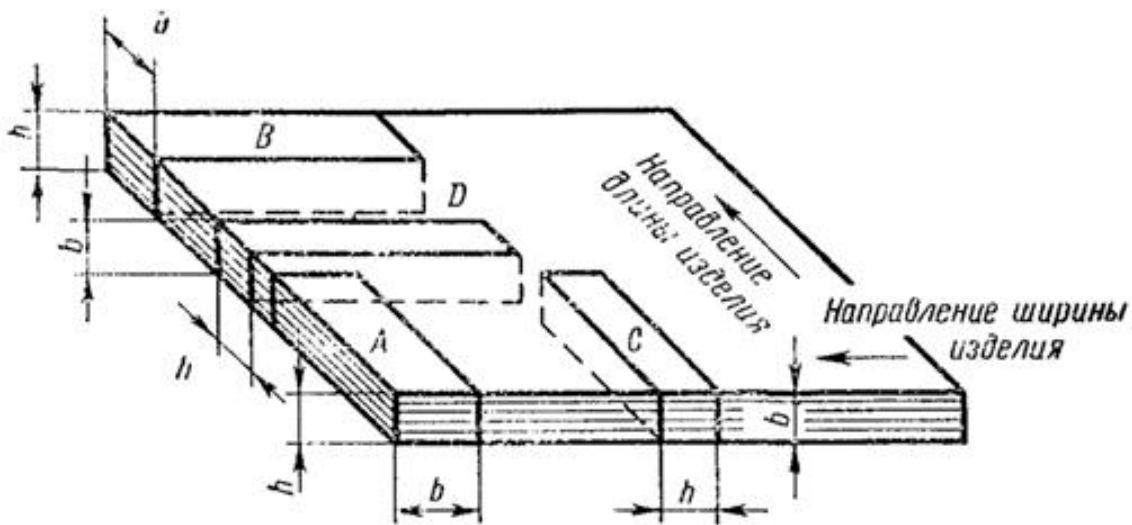


Рис. 1.32. Схема виготовлення зразків з листів анізотропних матеріалів

Час від закінчення виготовлення формованих зразків або заготовок для виготовлення зразків механічною обробкою до їх випробування складає не менше 16 годин, включаючи і час на їх кондиціонування, якщо в нормативно-технічній документації на матеріал немає інших вказівок.

1.2.3.2. Вимоги до апаратури

Випробування проводять на випробувальних машинах, що забезпечують рівномірну швидкість V відносного руху навантажувального наконечника і опор і дозволяють вимірювати навантаження з похибкою $\pm 1\%$, а прогину – з похибкою $\pm 2\%$. Застосовуються випробувальні машини, в яких зміщення динамометру у всьому діапазоні навантажень складає не більше 2 мм. Відстань між опорами регулюється.

На випробувальній машині розміщені пристрій з навантажувальним наконечником і опорами. Їх зближення проходить з постійною швидкістю.

Радіуси наконечника (r_1) і країв опор (r_2) має такі розміри в міліметрах:

- $r_1 = (5 \pm 0,1)$;
- $r_2 = (0,5 \pm 0,2)$ (при товщині зразка до 3 мм);
- $r_2 = (2,0 \pm 0,2)$ (при товщині зразка понад 3 мм).

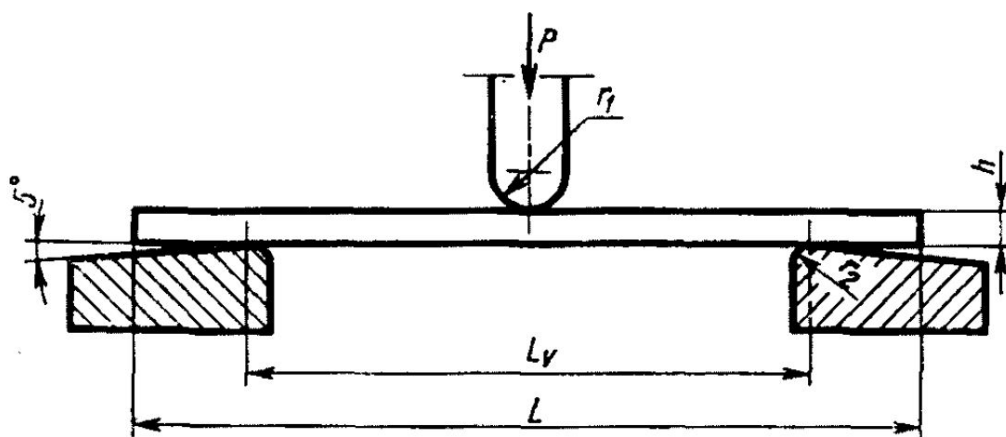


Рис. 1.33. Пристрій для випробування зразків полімерного матеріалу на згин

Величина переміщення голівки, пов'язаної з динамометром, не перевищує 0,5 мм. Пристрій з опорами забезпечує можливість їх установки і закріплення на потрібній між ними відстані.

Прилад для вимірювання зразків має забезпечувати визначення їх розмірів з похибкою $\pm 0,02$ мм.

1.2.3.3. Підготовка та проведення випробувань

Перед випробуванням в середній третині довжини зразка вимірюють ширину зразка з похибкою $\pm 0,1$ мм і товщину – з похибкою $\pm 0,02$ мм.

Перед випробуванням зразки кондиціонують згідно з вимогами [44] не менше 16 год. при температурі $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ і відносній вологості $(50\pm 5)\%$, якщо в нормативно-технічній документації на матеріал немає інших вимог. Випробування проводять в таких самих умовах.

Відстань між опорами l_V дорівнює $(15 \dots 17)h$. Цю відстань вимірюють з похибкою $\pm 0,5 \%$.

Для зразків, армованих односпрямованим волокном, і що мають дуже велику товщину, відстань між опорами вибирають, виходячи з найбільшого значення l_V/h , щоб уникнути руйнування від зсуву.

Зразок встановлюють на опори широкою стороною (рис. 1.33). Якщо зразок піддавався механічній обробці з одного боку, то його кладуть на опори тією стороною, яка не піддавалася механічній обробці. Навантаження зразка проводять посередині між опорами плавно, без поштовхів.

Швидкість відносного переміщення навантажувального наконечника і опор V має бути встановлена в нормативно-технічній документації на матеріал. За відсутності таких вказівок швидкість V в мм/хв. обчислюють за формулою:

$$V = 0,01 \frac{l_V^2}{6h},$$

Де l_V – відстань між опорами, мм; h – товщина зразка, мм.

Швидкість відносного переміщення навантажувального наконечника (V) при $l_V/h = (16\pm 1)$ дорівнює $h/2$. Допускається при контролі якості матеріалів використовувати швидкість 10 мм/хв.

Можливі два випадки деформування та руйнування зразка:

1. Зразок руйнується при заданій величині прогину або до досягнення цієї величини. При цьому визначають навантаження і прогин при руйнуванні.

2. Зразок не руйнується при заданій величині прогину або до досягнення цієї величини. Навантаження визначають у момент досягнення заданого прогину.

Випробування продовжують до руйнування зразка або до досягнення заданого максимального навантаження. У будь-якому з цих випадків визначають навантаження і прогин.

Якщо при випробуванні зразка максимальне значення навантаження спостерігається до досягнення заданої величини прогину, то визначають максимальне навантаження і відповідне йому значення прогину.

Якщо зразок руйнується поза середньою третиною відстані між опорами, то отриманий результат не зараховують і проводять повторне випробування на новому зразку.

1.2.3.4. Обробка результатів

Згинальне напруження (σ_z) в МПа при навантаженні обчислюють за формулою

$$\sigma_z = \frac{M}{W},$$

де M - згинальний момент, Н·мм; W - момент опору поперечного перерізу зразка, мм³.

Згинальний момент (M) в Н·мм обчислюють за формулою

$$M = \frac{Pl_V}{4},$$

де P – навантаження, Н; l_V – відстань між опорами, мм.

Момент опору поперечного перерізу зразка (W) в мм³ обчислюють за формулою

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6},$$

де b – ширина зразка, мм; h – товщина зразка, мм.

Звідси

$$\sigma_z = \frac{3Pl_V}{2bh^2}.$$

Згинальне напруження в МПа, з врахуванням горизонтальної складової згинального моменту при згині, обчислюють за формулою:

$$\sigma_z = \frac{Pl_V}{2bh^2} \left(1 + \frac{4Z^2}{l_V^2} \right),$$

де Z – прогин зразка посередині між опорами, мм.

За результат випробування приймають середнє арифметичне всіх паралельних визначень; характеристика розкиду даних оцінюється за величиною відхилення окремих значень, яку обчислюють за [48].

В протоколі, окрім загальних даних (р. 7), мають міститись такі відомості:

- фактичні розміри зразків та відстань між опорами;
- дані про сторону зразка, до якої прикладали навантаження;

При руйнуванні зразка:

- вид руйнування кожного зразка для випробувань;
- згинальне напруження кожного зразка у момент руйнування;
- прогин кожного зразка у момент руйнування.

За відсутності руйнування зразка:

- згинальне напруження кожного зразка при заданому прогині;
- згинальне напруження і прогин кожного зразка при максимальному значенні навантаження.

1.2.4. Визначення модулів пружності

Методика випробувань та способи розрахунків модулів пружності за розтягу, стиску та згину детально описані в [63]. Оскільки методики випробувань (вимоги до зразків, застосована апаратура, запис діаграм деформування) по-суті не відрізняються від описаних в розділах 1.2.1, 1.2.2 та 1.2.3, в цьому розділі ми лише опишемо способи розрахунків значень модулів пружності за одержаними діаграмами деформування.

Визначення модуля пружності за розтягу

Графічний запис навантаження і деформації проводимо в такому масштабі: не менше 100 мм на діаграмі має відповідати приросту навантаження, що відповідає збільшенню відносного видовження на 0,4%.

За діаграмою визначають величини навантаження, що відповідають величинам відносного видовження 0,1 і 0,3%. Допускаються менші значення відносного видовження для зразків, якщо зразки руйнуються при відносних деформаціях, менших 0,5%.

Модуль пружності за розтягу (E_p) в МПа розраховують за формулою:

$$E_p = \frac{(P_2 - P_1) \cdot l_0}{F_0 \cdot (\Delta l_2 - \Delta l_1)},$$

де P_2 – навантаження, що відповідає відносному видовженню 0,3%, Н; P_1 – навантаження, що відповідає відносному видовженню 0,1%, Н; l_0 – розрахункова довжина зразка, мм; F_0 – площа початкового поперечного перерізу зразка, мм²; Δl_2 – видовження, що відповідає навантаженню P_2 , мм; Δl_1 – видовження, що відповідає навантаженню P_1 , мм.

Визначення модуля пружності при стиску.

Графічний запис навантаження и деформації проводять у відповідності з вищеописаними рекомендаціями при аналогічних значеннях відносної деформації стиску.

За діаграмою визначають величини навантаження, що відповідають відносним деформаціям 0,1 та 0,3%.

Допускаються менші значення відносної деформації при стиску зразків, що мають менші деформації при руйнуванні.

Модуль пружності при стиску (E_c) в МПа розраховують за формулою

$$E_c = \frac{(P_2 - P_1) \cdot h_0}{F_0 (\Delta h_2 - \Delta h_1)},$$

де P_2 – навантаження, що відповідає відносному видовженню 0,3%, Н;
 P_1 – навантаження, що відповідає відносному видовженню 0,1%, Н;
 h_0 – початкова (базова) висота зразка, мм; F_0 – площа початкового поперечного перерізу зразка, мм²; Δh_2 – зміна висоти або бази, що відповідає навантаженню P_2 , мм; Δh_1 – зміна висоти або бази, що відповідає навантаженню P_1 , мм.

Визначення модуля пружності при згині.

Випробування на згин проводять двома методами:

А – при навантаженні за триточковою схемою (**рис. 1.34**);

Б – при навантаженні за чотириточковою схемою (**рис. 1.35**).

За методом **А** випробовуваний зразок навантажують посередині відстані між опорами. За методом **Б** зразок навантажують парою наконечників, розташованих в середній третині відстані між опорами.

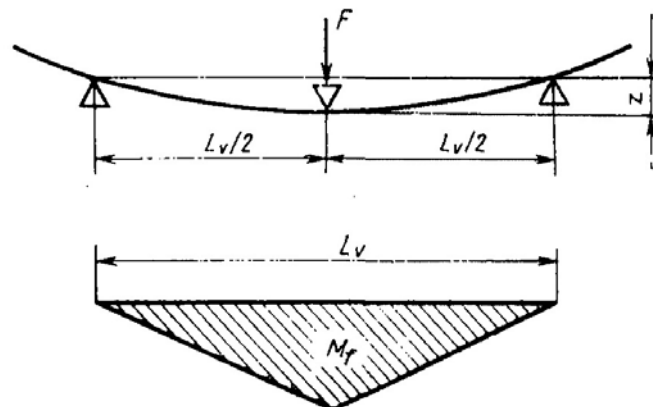


Рис. 1.34. Випробування зразків на згин за триточковою схемою

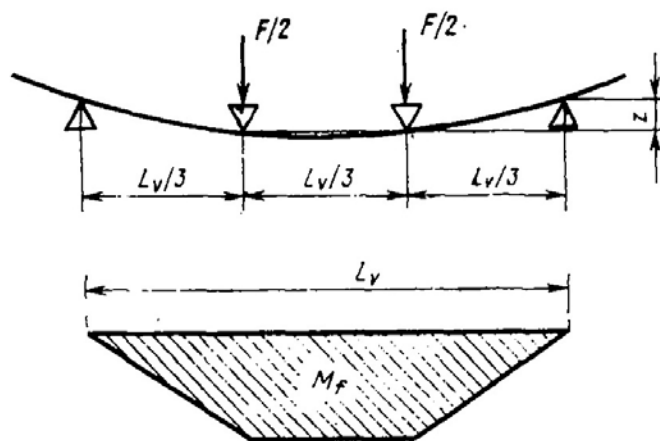


Рис. 1.35. Випробування зразків на згин за чотириточковою схемою

Прогин за методом **A** вимірюють посередині відстані між опорами (рис. 1.34). Величину прогину визначають як переміщення рухомої частини навантажувального пристрою; у методі **B** – відповідно до рис. 1.35.

Навантаження здійснюють до величини відносної деформації крайніх волокон 0,5%. Відносну деформацію крайніх волокон (ϵ) обчислюють за формулою

– для методу **A**

$$\epsilon = \frac{6Zh}{l_V^2};$$

– для методу **B**

$$\epsilon = \frac{Zh}{0,185l_V^2},$$

де Z – значення прогину, мм; h – товщина зразка, мм; l_V – відстань між опорами, мм.

Якщо зразки руйнуються до досягнення відносної деформації крайніх волокон 0,5%, навантаження здійснюють до меншої величини деформації.

За діаграмою визначають значення навантаження і прогину, що відповідають значенням відносної деформації крайніх волокон 0,1 і 0,3%.

Допускаються менші значення відносної деформації при вигині для зразків, передбачених в п. 3.5.5.

Модуль пружності при вигині (E_{32}) в МПа обчислюють за формулами:

– для методу **A**

$$E_{32} = \frac{l_V^2 (P_2 - P_1)}{4bh^3 (Z_2 - Z_1)},$$

– для методу **B**

$$E_{32} = \frac{0,185l_V^3 (P_2 - P_1)}{bh^3 (Z_2 - Z_1)},$$

де l_V – відстань між опорами, мм; P_2 – навантаження за відносної деформації крайніх волокон 0,3% , Н; P_1 – навантаження за відносної деформації крайніх волокон 0,1% , Н; b – ширина зразка, мм; h – товщина зразка, мм; Z_2 – прогин зразка, за відносної деформації крайніх волокон 0,3%, мм; Z_1 – прогин зразка, за відносної деформації крайніх волокон 0,1%, мм.

1.3. Вимірювання твердості та ударної в'язкості

1.3.1. Вимірювання твердості за Шором

Суть методу Шора [64] полягає у вимірюванні глибини втискування в матеріал металевого індентора (стержня) під дією сили.

Нижчеописаним методом визначають твердості пластмас за допомогою дюрometrів двох типів: дюрометра типа *A*, який застосовують для випробування м'якших пластмас, і дюрометра типа *D*, який застосовують для випробування твердіших пластмас. Метод дозволяє вимірювати глибину початкового вдавлювання, глибину вдавлювання після заданих періодів часу або і те, і інше разом.

Твердість при вдавлюванні назад пропорційна глибині вдавлювання і залежить від модуля пружності і в'язко-пружних властивостей матеріалу. На отримувані результати впливає форма індентора і сила, що прикладається до нього, тому між результатами, що отримують при випробуваннях з дюрOMETрами різних типів або іншими приладами для виміру твердості, не може бути прямої залежності.

Метод є емпіричним випробуванням, призначеним перш за все для контролю даного показника. Не існує простої залежності між твердістю, визначуваною за допомогою описуваного методу, і якою-небудь фундаментальною властивістю випробовуваного матеріалу.

Метод не поширюється на комірчасті пластмаси.

1.3.1.1. Вимоги до зразків

Товщина зразка для випробування має бути не менше 6 мм. Для досягнення необхідної товщини зразок для випробувань може складатися з декількох тонких шарів, але результати випробувань, отримані з такими зразками, можуть не узгоджуватися з результатами випробувань цілісних зразків, оскільки поверхні таких шарів інколи не повністю стикаються один з одним.

Розміри зразків мають дозволяти проводити випробування на відстані не менше 12 мм від будь-якого краю. Поверхня зразка в місці контакту з опорною поверхнею на площі радіусом не менше 6 мм від кінчика індентора має бути дуже рівною. На кривих, нерівних або шорстких поверхнях не можна отримати задовільні результати виміру твердості за допомогою дюрOMETра.

Зразки повинні мати рівну поверхню без раковин, здуття, тріщин і вм'ятин.

1.3.1.2. Вимоги до апаратури

ДюрOMETри типів А і D складаються з таких частин:

– опорна поверхня з отвором діаметром від 2,5 до 3,5 мм, центр якого знаходиться на відстані не менше 6 мм від будь-якого краю опори;

– індентор у вигляді загартованого сталевго стрижня діаметром 1.10 ... 1.40 мм, форма і розміри якого для дюрметрів типа *A* показані на рис. 1.36а, а для дюрметрів типа *D* – на рис. 1.36б;

– індикаторний пристрій, що показує міру висунення кінчика індентора за межі опорної поверхні (рис. 1.36); висунення виміряють безпосередньо в умовних одиницях в діапазоні від 0 (повне висунення кінчика на $2,50^{+0,04}$ мм) до 100 (відсутність будь-якого висунення); останнє відбувається при щільному притисканні поверхні індентора до скляної пластинки і слугує для калібрування приладу.

Калібрована пружина для прикладення до індентора сили, розраховується згідно однієї з формул, наведених в табл. 1.11.

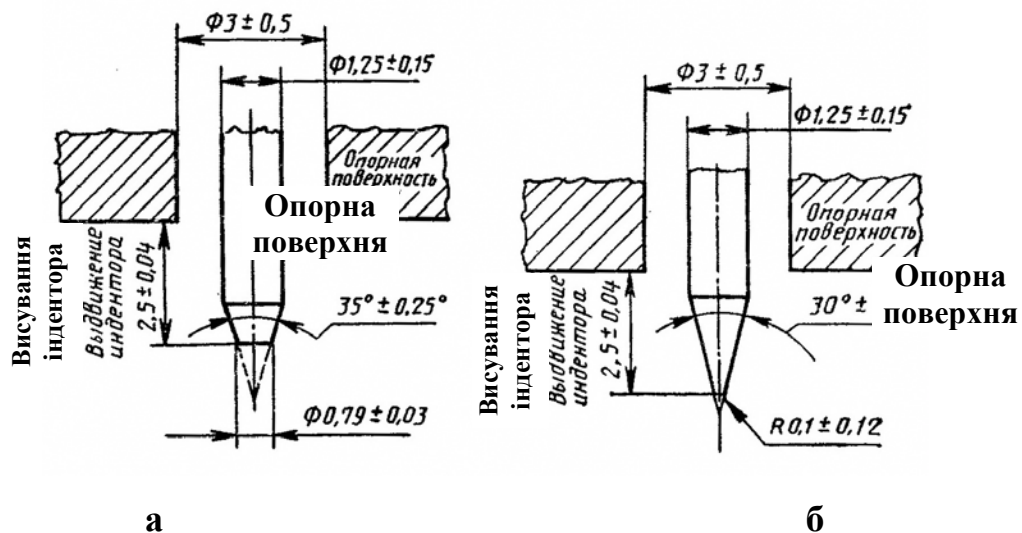


Рис. 1.36. Пристрої для вимірювання твердості полімерних матеріалів та конструкційних пластмас: а – для м'яких матеріалів, б – для твердих пластмас

Таблиця 1.11. Навантаження (*H*), що прикладається до індентора при калібруванні

Метод	Навантаження	Похибка
<i>A</i>	$(0,550+0,075) \cdot H_A$	0,078
<i>D</i>	$0,445 \cdot H_D$	0,441

Примітка. H_A та H_D – твердості за шкалою приладу в одиницях твердості за методами *A* та *D* відповідно.

1.3.4.3. Підготовка та проведення випробувань

Перед випробуванням зразки кондиціонують за [44] не менше 16 год. при температурі $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості $(50\pm 5)\%$. Випробування проводять за тих самих умов.

Зразок для випробування поміщають на тверду горизонтальну рівну поверхню. Дюрометр встановлюють у вертикальному положенні так, щоб кінчик індентора знаходився на відстані не менше 12 мм від будь-якого краю зразка. Якнайшвидше без поштовху до зразка притискають опорну поверхню дюрометра, тримаючи її паралельно поверхні випробовуваного зразка. До опорної поверхні прикладають тиск, достатній для забезпечення надійного контакту зі зразком.

Знімають покази індикаторного пристрою через $15+1$ с. Якщо необхідно зробити миттєвий вимір, то покази знімають впродовж 1 с. після притискання опорної поверхні до зразка. В цьому випадку записують максимальне значення, яке покаже індикатор дюрометра.

Проводять п'ять вимірів твердості в різних місцях поверхні зразка, але на відстані не менше 6 мм від точки попереднього виміру, і визначають середнє значення.

Примітка. Рекомендується, в разі отримання за допомогою дюрометра типу А значень, вищих 90, випробування проводити з використанням дюрометра типу D, а при отриманні за допомогою дюрометра типу D значень, менших 20, випробування проводити за допомогою дюрометра типу А.

В протоколі, окрім загальних даних (р. 7), мають міститись відомості про стан поверхні, на якій проводять вимірювання (шорсткість, наявність дефектів тощо).

1.3.2. Вимірювання твердості методом вдавлювання кульки

Вимірювання твердості методом вдавлювання кульки

Стандарт [65] встановлює метод визначення твердості пластмас шляхом вдавлювання навантаженої кульки. Твердість при вдавлюванні кульки визначається-

ся як відношення навантаження, прикладеного до кулькового індентора, до площі поверхні відбитка від вдавнення кулькового індентора після прикладання навантаження протягом встановленого часу. Величина виражається в Ньютона на квадратний міліметр.

Метод заснований на вдавлюванні кульки під дією заданого навантаження в поверхню зразка для випробування. Глибина вдавнення вимірюється під навантаженням. Площа поверхні відбитка по його глибині. Твердість при вдавлюванні кульки розраховується за співвідношенням:

$$\text{Твердість при вдавлюванні кульки} = \frac{\text{прикладене навантаження}}{\text{площа поверхні відбитку}}$$

1.3.2.1. Вимоги до зразків

Зразки для випробування являють собою гладкі плоскі пластини або блоки достатнього розміру для виключного впливу крайових ефектів на результати випробувань, наприклад, 50×50 мм. Зразки мають бути плоскими з паралельними поверхнями.

Рекомендована товщина має складати 4 мм.

На поверхні зразка для випробувань, що контактує з робочим столом, не повинні виявлятися деформації після випробування.

Допускається застосовувати зразки з розміром поверхні не менше 10×10 мм, або діаметром 10 мм, або зразки, складені з декількох пластин, при цьому загальна товщина зразка повинна бути не менше 4 мм, а число пластин має бути не більше трьох, якщо в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію немає інших вказівок.

1.3.2.2. Вимоги до апаратури

Апаратура для випробування повинна складатися з корпусу та платформи з робочим столом; кульки з відповідними кріпильними деталями і пристроями для плавного (без поштовху) прикладання навантаження (рис. 1.37).



а)



б)

Рис. 1.37. Прилад для вимірювання твердості пластмас методом вдавлювання кульки: а – загальний вигляд, б – кулька з кріпильними деталями та зразок матеріалу

У приладі має бути передбачений пристрій для вимірювання глибини вдавнення кульки. Гранична виміряна глибина вдавнення має бути не більшою 0,4 мм і виміряна з точністю $\pm 0,005$ мм. Деформація корпусу при максимальному навантаженні, що вимірюється вздовж основної осі прикладання сили, не має бути більшою 0,05 мм.

Кульковий індентор виготовлюють із загартованої сталі і полірують. Діаметр кульки $(5,0 \pm 0,05)$ мм. На кульці не повинно бути ніяких ознак деформації або пошкодження після випробувань.

Попереднє навантаження P_0 складає $(9,8 \pm 0,1)$ Н. Випробувальне навантаження P_m має одне з наступних значень: 49; 132; 358; 961 Н (допуск $\pm 1\%$). Допускається випробувальне навантаження 1470 Н.

Вимірювання часу проводиться з точністю $\pm(0,1 \dots 0,5)$ с.

1.3.2.3. Підготовка та проведення випробувань

Перед випробуванням зразки кондиціонують відповідно до [44]. Випробування проводять за тих самих умов, якщо нема інших вказівок.

Зразок для випробування має цілком поміщатись на робочому столі приладу. Поверхні зразка мають бути перпендикулярними до напрямку прикладеного навантаження.

Протягом 5-ти секунд прикладають попереднє навантаження так, щоб точка контакту кульки знаходилась на відстані не менше 10 мм від краю зразка. Встановлюють пристрій, що відраховує глибину вдавлювання, на нульову відмітку і додатково прикладають випробувальне навантаження протягом (2 ... 3) с. без удару.

Обирають значення випробувального навантаження з встановлених значень так, щоб отримати глибину вдавнення кульки від 0,15 до 0,35 мм.

Якщо через 30 с. глибина вдавлювання знаходиться поза вказаним інтервалом (або вся серія випробувань, або окреме значення), то слід величину навантаження при випробуваннях змінювати таким чином, щоб отримати глибину вдавлювання у межах (0,15 ... 0,35) мм .

Проводять випробування таким чином, щоб тріщини у випробувальних зразках не змогли впливати на результати. Якщо на одному і тому ж зразку проводять декілька визначень, випробування слід проводити в точках, розташованих на відстані не менше 10 мм один від одного і від країв зразка.

У випадку застосування зразків розміром поверхні не менше 10×10 мм або діаметром 10 мм, відстані між краями відбитків кульки і краями зразка повинно бути не меншими 5 мм.

Після прикладання навантаження P_m через 30 с вимірюють глибину вдавлювання під навантаженням h_1 з точністю $\pm 0,005$ мм. Проводять 10 випробувань.

Визначають деформацію корпусу приладу h_2 в міліметрах. Стандартом [65] рекомендований такий спосіб. Поміщують м'який мідний блок (не менше 6 мм

товщиною) на робочий стіл і накладають попереднє навантаження. Встановлюють пристрій для вимірювання глибини на нульову відмітку і прикладають випробувальне навантаження P_m . Витримують випробувальне навантаження до тих пір, поки показання на відмітці глибини вдавлювання не стане стаціонарним. Відмічають це значення, знімаючи навантаження, і знову встановлюють індикатор глибини вдавлювання на нульову відмітку.

Повторюють вищевказані операції до тих пір, поки дані індикатора глибини не будуть постійними після кожного прикладання навантаження. Це вказує на те, що отримане положення, за якого немає подальшого вдавлювання в мідний блок, і тому показник постійної глибини – це переміщення індикатора глибини, викликане деформацією корпусу приладу. Записують це постійне значення як h_2 .

Допускається отримання деформації корпусу і іншим методом, якщо він не дає більшої похибки в порівнянні з приведеним кінцевим результатом.

1.3.2.4. Обробка результатів

Зменшене значення навантаження P_r в ньютонах вираховують за формулою:

$$P_r = P_m \frac{0.21}{(h - h_r) + 0.21},$$

де P_m – навантаження на індикатор при випробуванні в ньютонах; h_r – зменшена глибина вдавлювання (0,25 мм); h_1 – глибина вдавлювання кульки під випробувальним навантаженням, мм; h_2 – деформація корпусу приладу під випробувальним навантаженням, мм; 0,21 – коефіцієнт зведення навантаження до глибини вдавлювання, що дорівнює 0,25 мм; $h = h_1 - h_2$ – глибина вдавлювання після внесення поправки на деформацію корпусу, мм;

Твердість при вдавлюванні кульки H в Н/мм² розраховують за формулою:

$$H = \frac{1}{5\pi} \times \frac{P_r}{h_r},$$

де H - твердість при вдавлюванні кульки, Н/мм²; P_r – зменшене навантаження, Н; h_r – зменшена глибина вдавлювання, мм.

Значення H менше 250 Н/мм² округлюють до 1 Н/мм². Значення H більше 250 Н/мм² округлюють до значень, що кратні 10 Н/мм².

Протокол вимірювання твердості оформлюють згідно з вимогами, наведеними в розділі 7.

1.3.3. ВИМІРЮВАННЯ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ ЗА ШАРПІ

Суть методу [67] полягає у випробуванні, за якого зразок, що лежить на двох опорах, піддається удару маятника, причому лінія удару знаходиться по середині між опорами і безпосередньо навпроти надрізу, яким оснащений зразок.

Випробування на удар за цим методом служить для оцінки поведінки зразків, передбачених цим стандартом, під дією ударних навантажень і для оцінки крихкості або в'язкості зразків.

1.3.3.1. Вимоги до зразків

Для випробування застосовують зразки (рис. 1.38), розміри яких наведені в табл. 1.12. Зразки виготовляють без надрізу і з надрізами, типи яких наведені на рис. 1.38, розміри - в табл. 1.13.

Товщина зразка під надрізом (S_k) повинна становити:

- для типу A – $2/3$ від товщини S ,
- для типу B – $0,8$ від товщини S .

Тип зразка і надрізу передбачають в нормативно-технічній документації на матеріал. Якщо така вказівка відсутня, рекомендується використовувати зразок типу 2, надріз типу B .

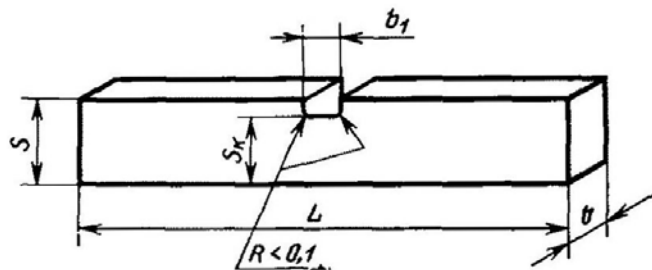
Таблиця 1.12. Розміри зразків (мм) для випробувань на удар за Шарпі

Тип зразка	Довжина L	Ширина b	Товщина S	Відстань між опорами l
1	120 ± 2	$15 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	70
2	80 ± 2	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$	60
3	50 ± 1	$6 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$	40

Таблиця 1.13. Розміри надрізів (мм) на зразках для випробувань на удар за Шарпі

Тип зразка	Тип надрізу	Товщина під надрізом S_k	Ширина надрізу b_1
1	<i>A</i>	$6,7 \pm 0,3$	$2 \pm 0,2$
	<i>B</i>	$8,0 \pm 0,3$	—
2	<i>A</i>	$2,7 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$
	<i>B</i>	$3,2 \pm 0,2$	—
3	<i>A</i>	$2,7 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,1$
	<i>B</i>	$3,2 \pm 0,2$	—

Надріз типу *A*



Надріз типу *B*

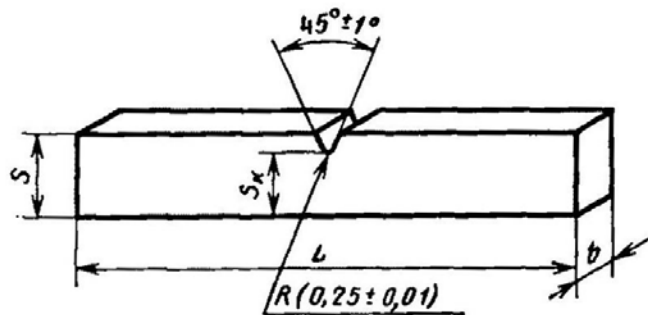


Рис. 1.38. Зразки типів *A* та *B* для вимірювання ударної в'язкості за Шарпі

Результати, отримані на зразках різних розмірів, виготовлених за різною технологією, непорівнянні.

Спосіб нанесення надрізу, контроль його форми і розмірів передбачають в нормативно-технічній документації на матеріал. Загальні вимоги щодо виготовлення зразків з надрізом наведені в додатку 3.

Абразивні ріжучі інструменти для нанесення надрізу застосовувати не допускається.

Для матеріалів, ударна в'язкість яких залежить від напрямку волокон або шарів, вирізують дві групи зразків з головними осями симетрії паралельно і перпендикулярно до основних напрямків. (рис. 1.39).

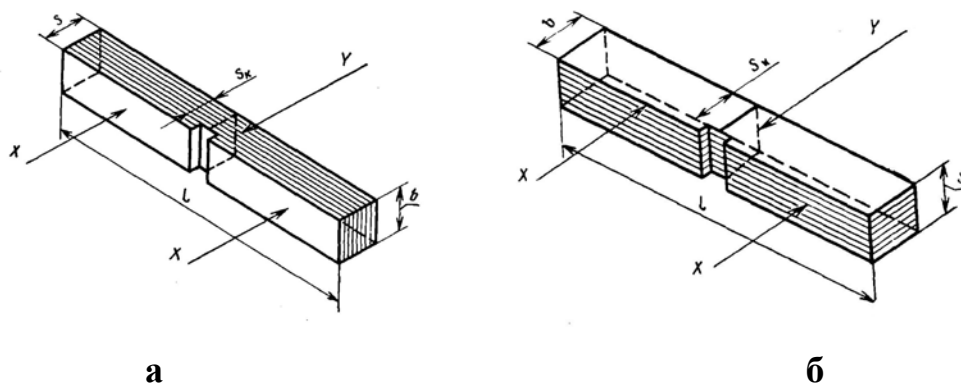


Рис. 1.39. Зразки з надрізом з шаруватого матеріалу: а - удар перпендикулярно шарам, б- удар паралельно шарам, X - напрям розташування опор, Y - напрям удару

Зразки повинні мати гладку рівну поверхню, без тріщин, сколів та інших видимих дефектів. Кількість зразків має бути не меншою 10.

1.3.3.2. Вимоги до апаратури

Для випробування використовують маятникові копри жорсткої конструкції, які забезпечують вимірювання енергії удару, затраченої на руйнування зразка, і яка визначається як різниця між початковим запасом потенційної енергії маятника і енергією, що залишилася у маятника після руйнування випробуваного зразка.

Характеристики маятникових копрів наведені в табл. 1.14, а розміри бойка маятника та опор – на рис. 1.40.

Табл. 1.14. Характеристики маятникових копрів для випробувань пластмас на удар за Шарпі

Запас енергії маятника, Дж	Швидкість маятника в момент удару, м/с	Максимальні втрати на тертя, %
0,5	2,9 ± 10 %	2
1,0		1
2,0		
4,0		
5,0	3,8 ± 10 %	0,5
7,5		
15,0		
25,0		
50,0		

Загальний вигляд копра МК-05, зразок та опори з маятником показані на рис. 1.41.

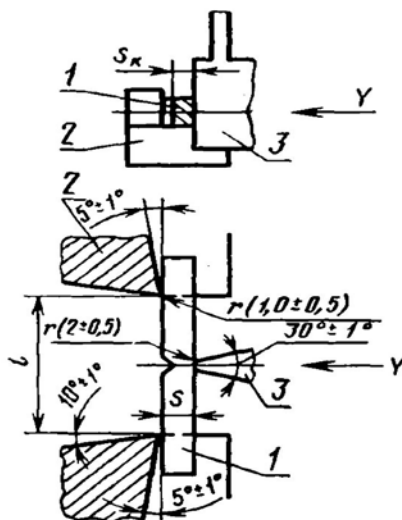


Рис. 1.40. Бойок маятника та опори: 1 – зразок, що випробовується; 2 – опора; 3 – маятник; Y – напрям удару (показаний надріз типу В)



а



б

Рис. 1.41. Маятниковий копер МК-05: загальний вигляд (а); зразок, опори та маятник (б)

Загальні вимоги до копрів для випробувань за Шарпі:

- похибка установки центру зразка по відношенню до бойка маятника має бути не більше 0,5 мм;
- опори повинні мати змінні блоки, щоб забезпечити випробування зразків різних розмірів, приведених в табл. 1.12;
- маятник повинен розташовуватися посередині між опорами з максимальним відхиленням 0,5 мм;
- маятник і опори мають бути встановлені так, щоб боек маятника при ударі стикався зі зразком по усій його ширині;
- лінія зіткнення має бути перпендикулярною до поздовжньої осі випробуваного зразка з відхиленням не більше 2° .

Вимірювання ширини і товщини зразків проводять приладом з похибкою вимірювання не більше 0,02 мм.

1.3.3.3. Підготовка та проведення випробувань

Перед випробуванням зразки кондиціонують в стандартній атмосфері за вимогами [44] та вимірюють ширину і товщину зразка в його середині приладом з похибкою вимірювання не більше 0,02 мм.

У зразків з надрізом вимірюють товщину в місці надрізу, використовуючи мікрометри з наконечником профілю, відповідного до профілю надрізу у кожного зразка. Для контролю якості надрізу вимірюють товщину зразка на обох кінцях надрізу і обчислюють середнє арифметичне.

Вибирають маятниковий копер з відповідним запасом енергії і швидкістю маятника, щоб на руйнування зразка було витрачено не менше 10% і не більше 80% запасу енергії. Якщо цій вимозі задовольняють характеристики декількох копрів, вибирають копер з найбільшим запасом енергії. Результати, отримані на копрах з різним запасом енергії, зіставляти не рекомендується.

Випробування проводять при температурі $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ і відносній вологості $(50 \pm 5)\%$. Слід виконати кілька контрольних випробувань без зразків, щоб переконатися, що загальні втрати на тертя не перевищують значень, приведених в табл. 1.14.

Зразок без надрізу розміщують на опорах маятничого копра так, щоб удар бойка маятника припадав на середину зразка. Зразок з надрізом розміщують на опорах маятничого копра так, щоб удар бойка маятника припадав на ненадрізану площину зразка напроти надрізу.

Встановлюють покажчик шкали енергії так, щоб він дотикався до ведучого кулачка, коли маятник перебуває в положенні, при якому ніж маятника дотикається до зразка. Піднімають, закріплюють та обережно (без ривка) відпускають маятник. Відраховують за шкалою значення енергії, витраченої на руйнування зразка.

Враховують результати, отримані на зразках, що зруйнувалися повністю або з поділом на частини, утримуються на тонкій плівці (нитці).

1.3.3.4. Обробка результатів

Ударну в'язкість зразків без надрізів (a_n) в кДж/м² (кгс·см/см²) обчислюють за формулою

$$a_n = \frac{A_n}{b \cdot s} \cdot 10^3,$$

де A_n - енергія удару, витрачена на руйнування зразка без надрізу, Дж (кгс·см); b - ширина зразка в його середині, мм (см); s - товщина зразка в його середині, мм (см).

Ударну в'язкість зразка з надрізом (a_k) в кДж/м² (кгс·см/см²) обчислюють за формулою

$$a_k = \frac{A_k}{b \cdot s_k} \cdot 10^3,$$

де A_k - енергія удару, витрачена на руйнування зразка з надрізом, Дж (кгс·см); b - ширина зразка в його середині, мм (см); s_k - товщина зразка під надрізом, мм (см).

Обчислюють середнє арифметичне результатів випробування, середньоквадратичне відхилення та коефіцієнт варіації.

Відносну ударну в'язкість (kz) у відсотках обчислюють за формулою

$$kz = a_k / a_n$$

Всі обчислені значення округлюють до двох значущих цифр.

Окрім відомостей, зазначених в розділі 7, протоколи випробування мають містити такі дані:

- тип маятникового копра та швидкість удару;
- при випробуванні зразків шаруватих пластиків – положення надрізу і напрямку удару щодо розташування шарів;

- при випробуванні зразків, вирізаних з напівфабрикатів або готових виробів – положення зразка у виробі, з якого він вирізаний;
- при випробуванні зразків з анізотропних пластмас - місце і напрям вирізки, положення надрізу і напрямку удару;
- зовнішній вигляд зразків після випробування із зазначенням, руйнується зразок чи ні.

1.3.4. Вимірювання ударної в'язкості за Ізодом

Суть методу [66] полягає в руйнуванні консольно-закріпленого зразка з надрізом ударом маятника поперек зразка на певній відстані від місця закріплення.

1.3.4.1. Вимоги до зразків

Для випробування застосовують зразки чотирьох типів з надрізами двох типів (*A* і *B*), виготовлені відповідно до рис. 1.42. Розміри зразків наведені в табл. 1.15.

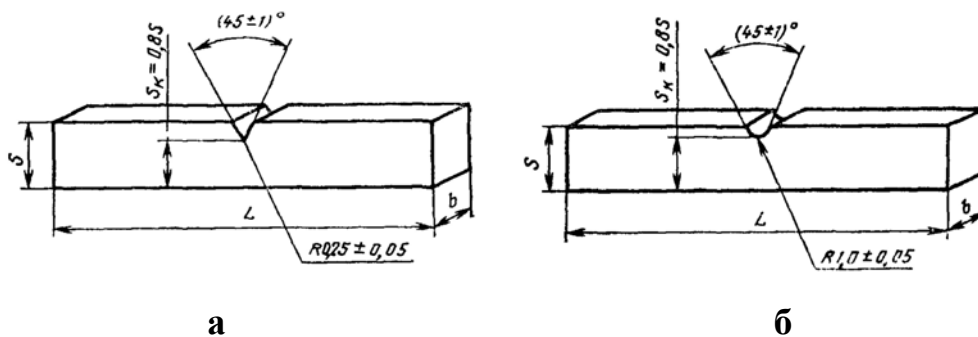


Рис. 1.42. Зразки з надрізами типу *A* (а) та *B* (б) для вимірювання ударної в'язкості за Ізодом

Таблиця 1.15. Розміри зразків (мм) для випробувань на удар за Ізодом

Тип зразка	Довжина L	Товщина s	Ширина b
1	$63,5 \pm 2,0$	$12,7 \pm 0,5$	$3,2 \pm 0,2$
2	$63,5 \pm 2,0$	$12,7 \pm 0,5$	$6,4 \pm 0,2$
3	$63,5 \pm 2,0$	$12,7 \pm 0,5$	$12,7 \pm 0,5$
4	$80,0 \pm 2,0$	$10,0 \pm 0,5$	$4,0 \pm 0,2$

У відповідності з вимогами нормативно-технічної документації на конкретну продукцію визначають:

- тип зразка, тип і спосіб нанесення надрізу, метод відбору зразків;
- контроль форми і розмірів надрізу;
- напрямок вирізання зразків з анізотропних і шаруватих матеріалів, положення надрізу і напрям удару по відношенню до шарів;
- можливість використання зразків, складених з двох частин по ширині;
- кількість зразків.

Зразки для випробування виготовляють формуванням (методом лиття під тиском, пресуванням і ін.) або механічною обробкою.

Для нанесення надрізу абразивні ріжучі інструменти не можуть застосовуватись.

При виготовленні зразків з листових або листових шаруватих матеріалів товщина зразка має бути рівною товщині листа при направленні удару перпендикулярно шарам (рис. 1.43а), а при направленні удару паралельно шарам (рис. 1.43б) ширина зразка має дорівнювати товщині листа.

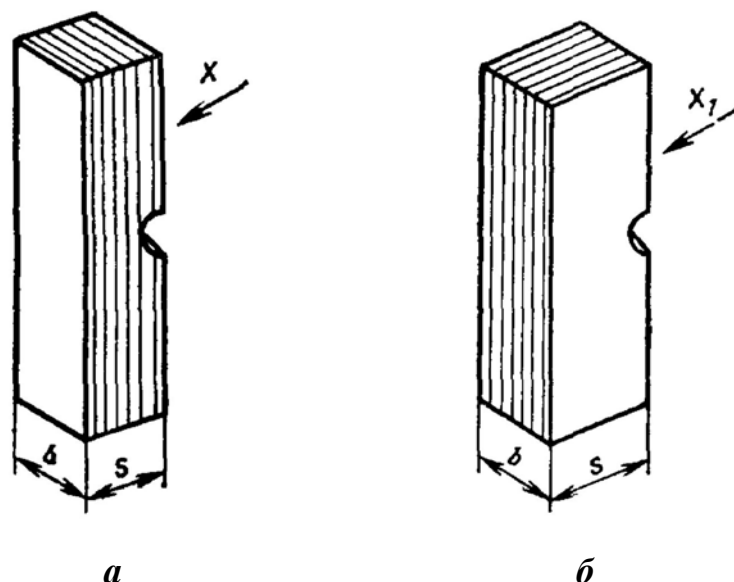


Рис. 1.43. Зразки з надрізами з шаруватих матеріалів для вимірювання ударної в'язкості за Ізодом: X - напрям удару перпендикулярно шарам (а); X_1 - напрям удару паралельно шарам (б)

Зразки для випробувань на удар перпендикулярно шарам (рис. 1.42 а) виготовлюють з листів товщиною не менше 12.7 мм. Зразки, виготовлені з листів товщиною понад 12.7 мм, піддають механічній обробці з двох сторін рівномірно до товщини (12.7 ± 0.5) мм, або з одного боку, якщо це передбачено в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію .

При механічній обробці зразків з одного боку надріз наносять на необроблену сторону зразка.

Зразки, виготовлені з листів товщиною менше 3.2 мм, складають у кілька шарів до отримання розміру від 3.2 до 12.7 мм.

При виготовленні зразків механічною обробкою з листів, плит або виробів спосіб і умови обробки зразків мають відповідати вимогам стандарту [61], р. 1.1.5. Зразки повинні мати гладку рівну поверхню, без тріщин, раковин, вм'ятин, відколів та інших видимих дефектів.

Якщо кількість зразків не передбачена нормативно-технічною документацією на конкретну продукцію, то зразків повинно бути не менше 10.

1.3.4.2. Вимоги до апаратури

Характеристики маятникових копрів наведені в табл. 1.16. Способи нанесення удару зображені на рис. 1.44.

Таблиця 1.16. Характеристики маятникових копрів для випробувань пластмас на удар за Ізодом

Запас енергії маятника, Дж	Швидкість маятника в момент удару, м/с	Максимальні втрати на тертя, %
1,0	3,5 ±10%	2,0
2,5		1,0
5,0		0,5
7,5		
15,0		
25,0		
50,0		

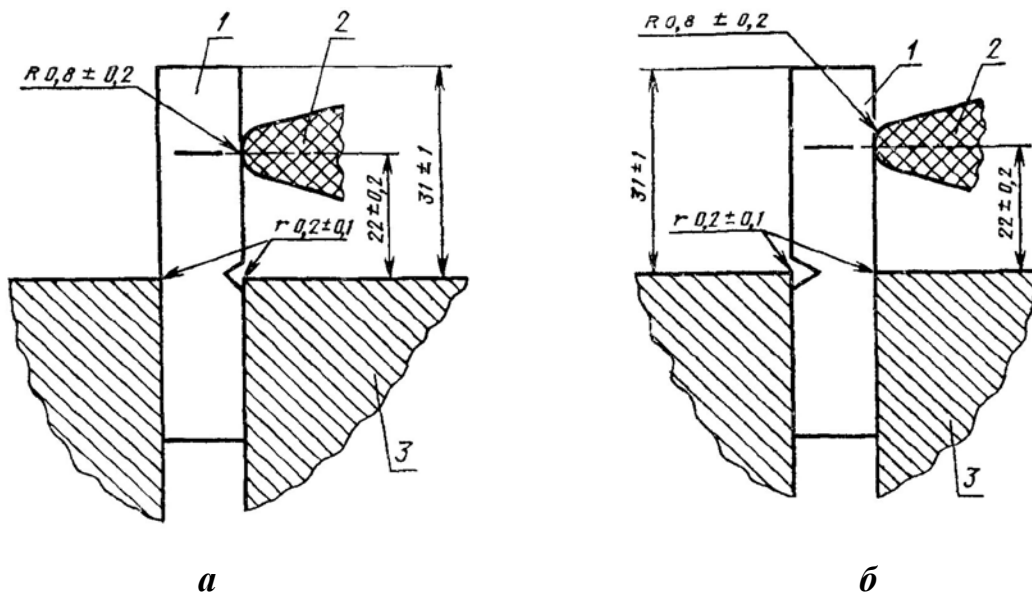


Рис. 1.44. Схеми випробування зразка з надрізом (а) та «перевернутого зразка» (б)

Бойок маятника повинен мати циліндричну поверхню радіусом $(0,8 \pm 0,2)$ мм з горизонтально розташованою віссю.

Конструкція копра має забезпечувати зіткнення бойка маятника зі зразком по всій його ширині в момент удару на відстані $(22 \pm 0,2)$ мм від верхньої площини затискувача і збіг поздовжньої осі зразка з вертикальною, осьовою лінією бойка маятника з допустимим відхиленням 0,5 мм. Лінія дотику повинна бути перпендикулярна поздовжній осі зразка з допустимим відхиленням не більше 2° .

Відстань між віссю обертання маятника і центром удару має збігатися з відстанню між віссю обертання маятника і точкою дотику бойка маятника зі зразком з допустимим відхиленням не більше 1%.

Верхні краї затискувача повинні мати радіус закруглення $(0,2 \pm 0,1)$ мм. Верхня площина затискувача має збігатися з горизонтальною площиною, що перетинає вершину кута надрізу, з відхиленням не більше 0,5 мм.

Прилади для вимірювання розмірів зразків мають забезпечувати вимірювання з похибкою не більше 0,02 мм.

1.3.4.3. Підготовка та проведення випробувань

Перед випробуванням зразки кондиціонують та випробують при температурі $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ і відносній вологості $(50\pm 5)\%$ [44], якщо в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію немає інших вказівок.

Маятниковий копер вибирають відповідно до табл. 1.16 так, щоб на руйнування зразка було витрачено не менше 10% і не більше 80% запасу енергії. Якщо цій вимозі відповідають кілька маятників, то використовують маятник з найвищим запасом енергії.

Зразок закріплюють у приладі так, щоб горизонтальна площина, яка перетинає вершину кута надрізу, була на рівні верхньої площини затиску, а надріз звернений в сторону маятника (рис. 1.44а). Надріз «перевернутого зразка» має бути на стороні, протилежній до маятника (рис. 1.44б).

Маятник піднімають і закріплюють у верхньому вихідному положенні, потім обережно (без ривка) відпускають його. Відраховують за шкалою значення енергії, витраченої на руйнування зразка, і визначають вид руйнування. У розрахунку беруть результати, отримані на зруйнованих зразках.

1.3.4.9. Обробка результатів

Ударну в'язкість зразка, кДж/м^2 обчислюють за формулою:

$$a_k = \frac{A}{b \cdot s_k} \cdot 10^3,$$

де A – енергія удару, витрачена на руйнування зразка, Дж; b – ширина зразка, мм; s_k – товщина зразка під надрізом, мм.

За результат приймають середнє арифметичне всіх випробувань, округлене до двох значущих цифр; якщо передбачається нормативно-технічною документацією на конкретну продукцію, то визначають величину стандартного відхилення за [48].

Окрім відомостей, зазначених в розділі 7, протокол випробування повинен містити таку інформацію:

- тип зразка і надрізу;
- тип маятникового копра, максимальну енергію маятника;
- положення надрізу, напрямок удару щодо розташування шарів і ширина зразка при виготовленні з шаруватого матеріалу;
- місце і напрям вирізки зразків з анізотропних пластмас.

Питання для самоперевірки знань за розділом 1

1. Назвіть основні вузли машини для випробувань на розтяг, стиск та згин.
2. Від чого залежить вибір швидкості деформування зразків при випробуваннях? Назвіть стандартні швидкості випробувань пластмас.
3. Які типи зразків використовуються при випробуваннях на розтяг, стиск та згин? Які форми зразків є оптимальними?
4. Які дані вводять у випробувальну машину при випробуваннях на розтяг, стиск та згин?
5. Що потрібно знати, щоб правильно вибрати режими випробувань та вхідні дані для автоматичної роботи випробувальної машини?
6. Який порядок побудови діаграм деформування за розтягу?
7. Як перебудувати вихідну діаграму деформування у криву «напруження - відносна деформація»?
8. Назвіть характерні точки діаграми деформування полімеру.
9. Які основні відмінності діаграм деформування полімерних матеріалів від діаграм металів?
10. Які причини розбіжності результатів випробувань матеріалів?
11. Як визначають статистичні характеристики результатів випробувань?
12. Яким вимогам повинні відповідати зразки при випробуваннях на стиск?
13. Як розраховують механічні характеристики матеріалу при випробуваннях на згин?
14. Які особливості випробувань анізотропних матеріалів?
15. Якими способами вимірюють ударну в'язкість пластмас?
16. Які відомі способи визначення твердості полімерів?

2. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКО-ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В процесі експлуатації елементів конструкцій, деталей та інших виробів, виготовлених з конструкційних полімерів, ці об'єкти протягом тривалого часу можуть бути піддані різного роду навантаженням в експлуатаційному діапазоні температур, а також при дії інших експлуатаційних факторів. Виникнення та розвиток у часі деформацій виробів можуть привести до втрати їх експлуатаційних властивостей ще до руйнування цих об'єктів. Тому розрахунок напружено-деформованого стану елементів конструкцій та інших об'єктів, виготовлених з полімерів та конструкційних пластмас неможливий без знання законів накопичення та убування деформацій при певних законах навантаження.

Порівняння величини та швидкості накопичення деформацій різних типів полімерних матеріалів з метою вибору типу матеріалу, що є найменш чутливим до зовнішніх навантажень в робочих діапазонах температур – одна з важливих задач експериментальних досліджень нових матеріалів.

Визначення характеристик в'язко-пружності полімерів та інших матеріалів – задача, що вирішується виключно експериментальним шляхом. В даній главі розглядаються методи вимірювання повзучості та релаксації напружень, що є основою експериментальних досліджень нових матеріалів. Тут також у стислому вигляді викладені теоретичні відомості про в'язко-пружні характеристики цих матеріалів, необхідні для оволодіння експериментальними методами.

2.1. В'язко-пружні характеристики полімерів

2.1.1. Складові деформації та основні рівняння лінійної в'язко-пружності

Повна деформація полімеру складається з таких видів деформації:

- миттєво-пружної;
- високо-еластичної;
- миттєво-пластичної;
- в'язкої незворотної.

Миттєво-пружна деформація ε_{np} поширюється в матеріалі зі швидкістю звуку. Вона пов'язана зі зміною валентних зв'язків або кутів, тобто з малою зміною міжмолекулярних та міжатомних відстаней.

Високо-еластична (в'язко-пружна або затримана) деформація ε_{ve} є результатом зміни середньостатистичної зігнутої 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.

Миттєво-пластична (незворотна) деформація ε_{nl} виникає одночасно з миттєво-пружною.

В'язка незворотна (типу течії) ε_T , яка має місце при значних напруженнях і тривалих навантаженнях. При температурах, менших від температури переходу у в'язко-текучий стан, вона пов'язана з механізмом високо-еластичної 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

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

де t – заданий час.

Переважання тієї чи іншої деформації залежить від умов (температури, величини та виду навантаження, часу, швидкості деформування) та стану мате-

ріалу (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'язко-пружні деформації, які за абсолютними величинами можуть в кілька разів перевищувати миттєво-пружні. Менше значення в цьому підстані відіграють миттєво-пластичні, й зовсім невелике – незворотні деформації типу течії, тобто (рис. 2.1)

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{np} + \varepsilon_{ee}(t).$$

Для побудови рівнянь, які описують в'язко-пружну поведінку матеріалів, суттєву допомогу можуть надати механічні моделі, що складаються з пружних (у вигляді 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 $\varepsilon_{ee}(t)$.

Зв'язок між напруженнями і деформаціями для пружного елемента (рис. 2.2а) описується законом Гука:

$$\sigma = E_0 \cdot \varepsilon, \quad (2.1)$$

де E_0 – миттєвий модуль пружності.

Для в'язкого елемента (рис. 2.2б) виконується закон течії Ньютона

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (2.2)$$

де η – коефіцієнт в'язкості демпфера.

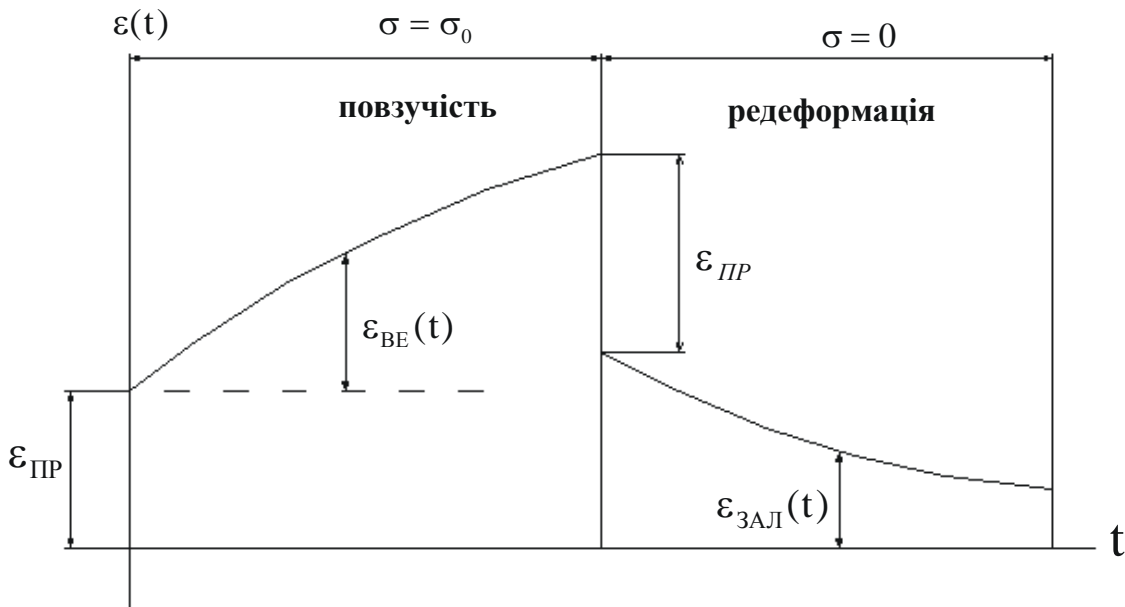


Рис. 2.1. Типова крива повзучості та деформації відновлення розмірів зразка в'язко-пружного матеріалу, що знаходиться в склоподібному стані, при розтягу: σ_0 - постійно діюче напруження; $\varepsilon(t)$ - повна деформація зразка; $\varepsilon_{пр}$ - пружна деформація; $\varepsilon_{ве}(t)$ - високо-еластична деформація; $\varepsilon_{зал}(t)$ - залишкова (та, що не зникла в даний час t) деформація.

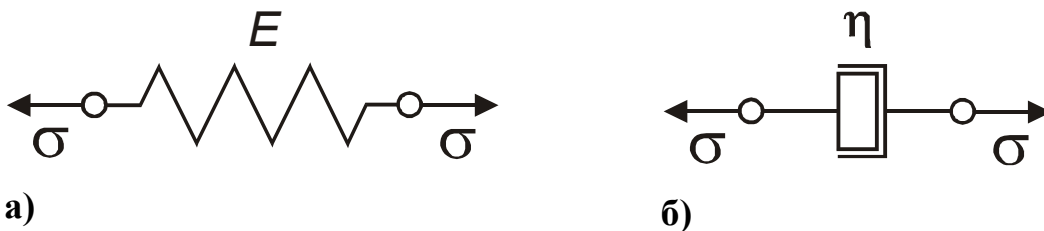


Рис. 2.2. Пружний (E) та в'язкий (η) елементи

Ці елементи можна з'єднувати послідовно або паралельно. У першому випадку маємо механічну модель Максвела (рис. 2.3а). Диференціальне рівняння, що відповідає цій моделі, має вигляд:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E_0} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \cdot \sigma \quad (2.3)$$

Інтегруючи рівняння (2.3) при $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{Const}$ (релаксація напружень при постійній деформації), маємо з урахуванням початкових умов (при $t=0$ $\sigma = \sigma_0$)

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \exp(-t/\tau), \quad (2.4)$$

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:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot E(t), \quad (2.5)$$

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. 2.3б), що являє собою набір пружних та в'язких елементів. Рівняння, що відповідає цій моделі, має вигляд:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot \sum_{i=1}^n E_i \cdot \exp(-t/\tau_i), \quad (2.6)$$

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 (2.6), зображена на рис. 2.4.

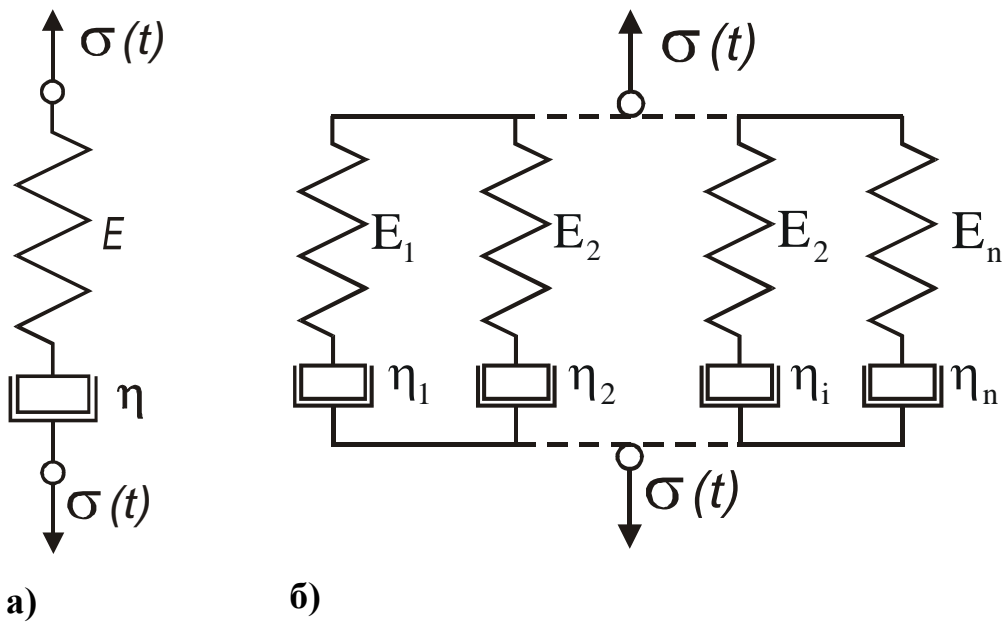


Рис. 2.3. Модель Максвелла (а) та узагальнена модель Максвелла (б)

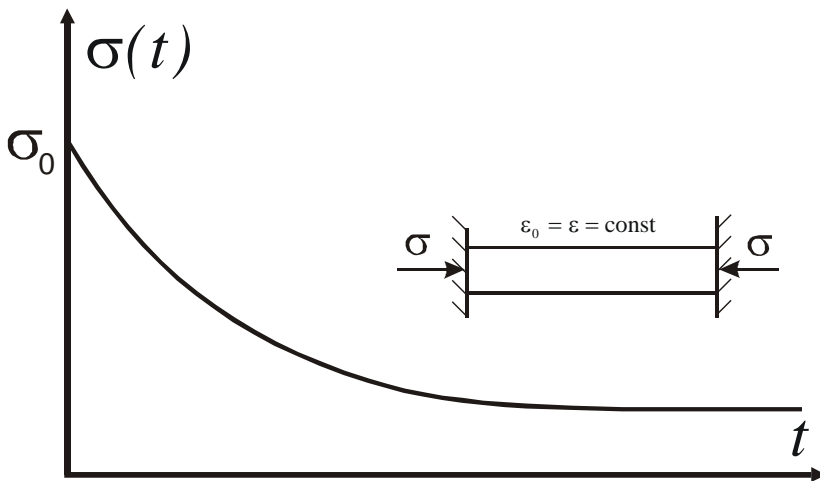


Рис. 2.4. Крива релаксації напружень у в'язко-пружному матеріалі, якій відповідає узагальнена модель Максвелла та рівняння (2.6)

При використанні операторної форми запису (2.5) модуль релаксації

$$E(t) = \sum_{i=1}^n E_i \cdot \exp(-t / \tau_i). \quad (2.7)$$

При паралельному з'єднанні елементів (рис. 2.5а) маємо модель Кельвіна-Фойгта, диференційне рівняння для якої має такий вигляд:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (2.8)$$

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

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} \cdot [1 - \exp(-t / \lambda)], \quad (2.9)$$

або

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 [1 - \exp(-t / \lambda)], \quad (2.10)$$

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

Рівняння (2.9) можна записати в операторному вигляді:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 I(t), \quad (2.11)$$

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. 2.5б). Рівняння, що описує повзучість згідно такої моделі, має вигляд:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \lambda_i)], \quad (2.12)$$

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

При використанні операторного рівняння (2.11)

$$I(t) = \sum_{i=1}^n I_i \cdot [1 - \exp(-t / \lambda_i)]. \quad (2.13)$$

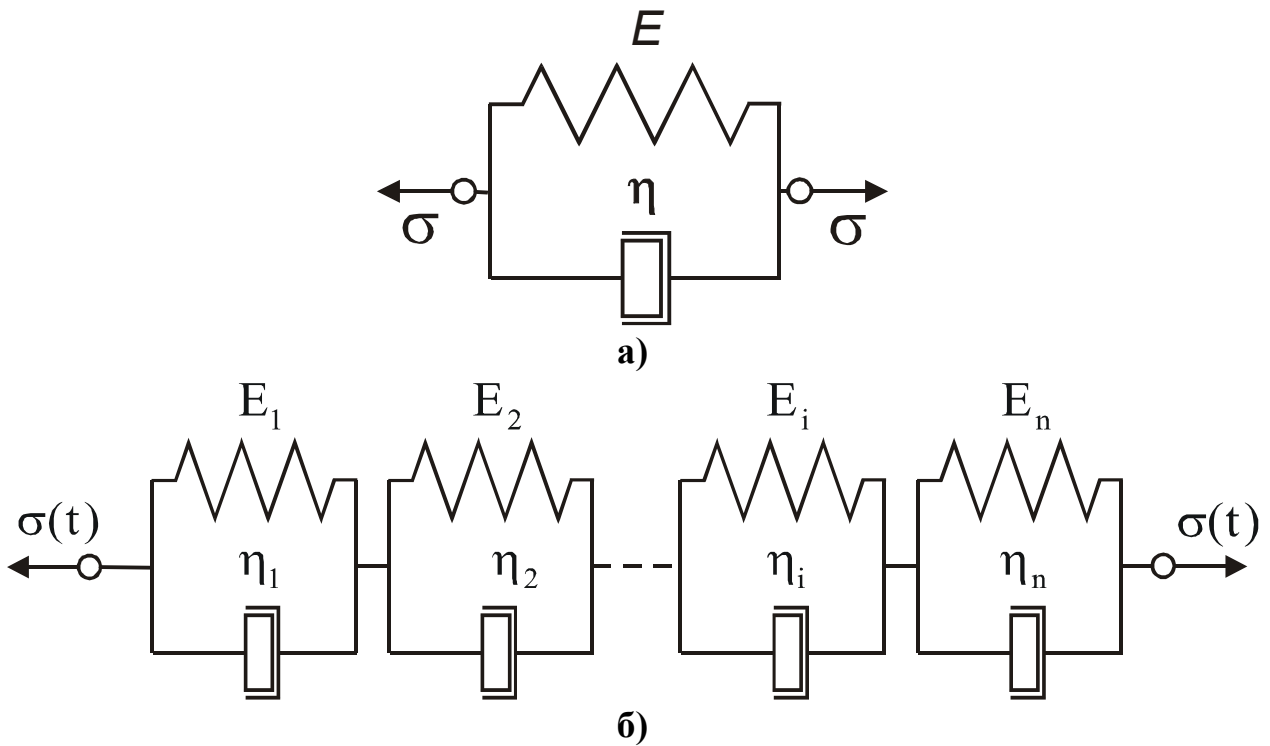


Рис. 2.5. Двоелементна (а) та узагальнена моделі Кельвіна-Фойгта (б)

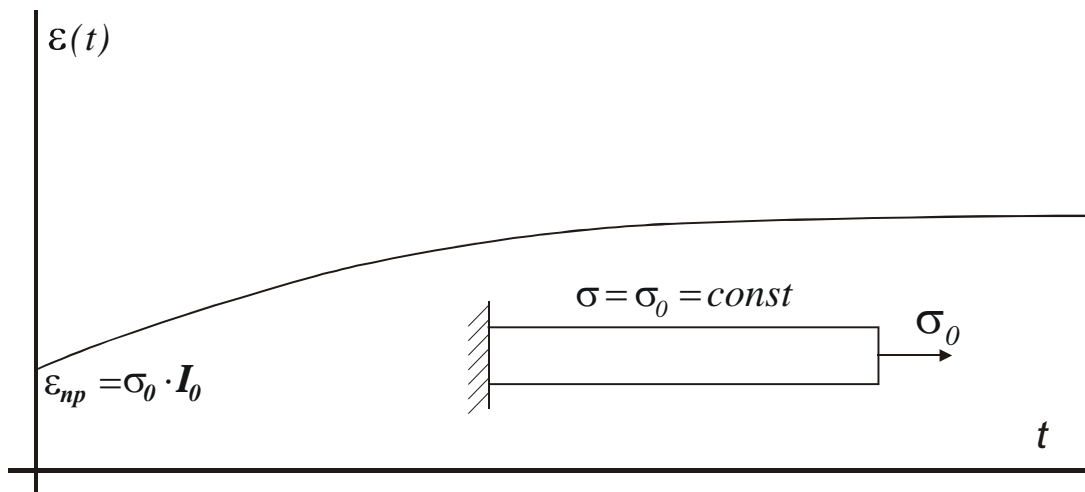


Рис. 2.6. Крива повзучості в'язко-пружного матеріалу, якій відповідає узагальнена модель Кельвіна-Фойгта та рівняння (2.14)

Більш точний опис експериментальних кривих повзучості можна одержати, якщо в узагальнену модель Кельвіна-Фойгта ввести елемент з $\lambda_0 = 0$. У цьому випадку рівняння (2.12) та (2.13) запишуться у вигляді:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 I_0 + \sigma_0 \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \lambda_i)]; \quad (2.14)$$

$$I(t) = I_0 + \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \lambda_i)], \quad (2.15)$$

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

Типова крива повзучості при постійно діючому напруженні, що описується рівнянням (2.14), зображена на рис. 2.6.

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.

Основні рівняння спадкової лінійної в'язко-пружності

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

$$S_{ij}(t) = \int_0^t R_c(t-s) de_{ij}(s); \quad (2.16)$$

$$\sigma(t) = \int_0^t R_V(t-s) d\theta(s); \quad (2.17)$$

$$e_{ij}(t) = \int_0^t \Pi_c(t-s) dS_{ij}(s); \quad (2.18)$$

$$\theta_{ij}(t) = \int_0^t \Pi_V(t-s) d\sigma(s). \quad (2.19)$$

Тут S_{ij} і e_{ij} – компоненти девіаторів 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 (2.16) – (2.19) частинами, одержуємо:

$$S_{ij} = 2G \cdot e_{ij}(t) - 2G \int_0^t \Gamma_C(t-s) \cdot e_{ij}(s) ds; \quad (2.20)$$

$$\sigma(t) = B \cdot \theta(t) - B \int_0^t \Gamma_V(t-s) \cdot \theta(s) ds; \quad (2.21)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2G} \cdot S_{ij}(t) + \frac{1}{2G_0} \int_0^t K_C(t-s) \cdot S_{ij}(s) ds; \quad (2.22)$$

$$\theta(t) = \frac{1}{B} \cdot \sigma(t) + \frac{1}{B_0} \int_0^t K_V(t-s) \cdot \sigma(s) ds, \quad (2.23)$$

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 (2.20) та (2.22) набувають такого вигляду:

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) - E_0 \int_0^t \Gamma(t-s) \varepsilon(s) ds; \quad (2.24)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_0} \sigma(t) + \frac{1}{E_0} \int_0^t K(t-s) \sigma(s) ds, \quad (2.25)$$

де $\Gamma(t)$, $K(t)$ – функції швидкостей релаксації та повзучості відповідно.

Приймаючи ядро K рівняння (2.25) у вигляді суми експоненціальних функцій, одержуємо співвідношення для апроксимації дослідних кривих повзучості в лінійній області при $\sigma = \sigma_K = Const$

$$\varepsilon(t) = \sigma_K \cdot I_0 + \sigma_k \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \tau_i)], \quad (2.26)$$

де $I_0 = 1/E_0$ – миттєва податливість; I_i, τ_i – коефіцієнти.

Зазначимо, що рівняння повзучості (2.26) повністю збігається з рівнянням (2.14), 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 слабо-сингулярне ядро:

$$\Gamma(t) = Ae^{-\beta t} t^{\alpha-1} \quad (0 < \alpha < 1), \quad (2.27)$$

для якого при будь-якому t

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

Його резольвента:

$$K(t) = \frac{e^{-\beta t}}{t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[A\tilde{\Gamma}(\alpha)^n] t^{\alpha n}}{\tilde{\Gamma}(\alpha n)}, \quad (2.28)$$

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

Функції (2.27), (2.28) та їх інтеграли детально протабульовані, розроблені ефективні методи визначення параметрів α, β, A за експериментально одержаними кривими повзучості та релаксації [7].

2.1.2. Принцип температурно-часової аналогії

При підвищенні температури зростає рухливість 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'язко-пружних 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'язко-пружних 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:

$$\ln a_T = c \frac{T - T_0}{T} \quad (2.29)$$

або

$$\ln a_T = \frac{a(T - T_0)}{b + (T - T_0)}, \quad (2.30)$$

де a і b – коефіцієнти.

Вираз (2.30) 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 термореологічно простих матеріалів мають місце такі залежності:

$$I(t, T) \equiv I(t')|_{T=T_0}, \quad (2.31)$$

$$\tilde{E}(t, T) \equiv E(t')|_{T=T_0}, \quad (2.32)$$

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 зі співвідношень (2.4) - (2.7), (2.9) - (2.26) 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 (2.26) при постійній температурі набуває вигляду:

$$\varepsilon(t) = \sigma_K \cdot I_0 + \sigma_K \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t \cdot a_T(T) / (\tau_i))]. \quad (2.33)$$

2.2. Обладнання для вимірювання повзучості та релаксації напружень

2.2.1. Випробувальна установка для вимірювання повзучості полімерних матеріалів

Випробувальна установка, схема якої наведена на рис. 2.7, 2.8, 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.

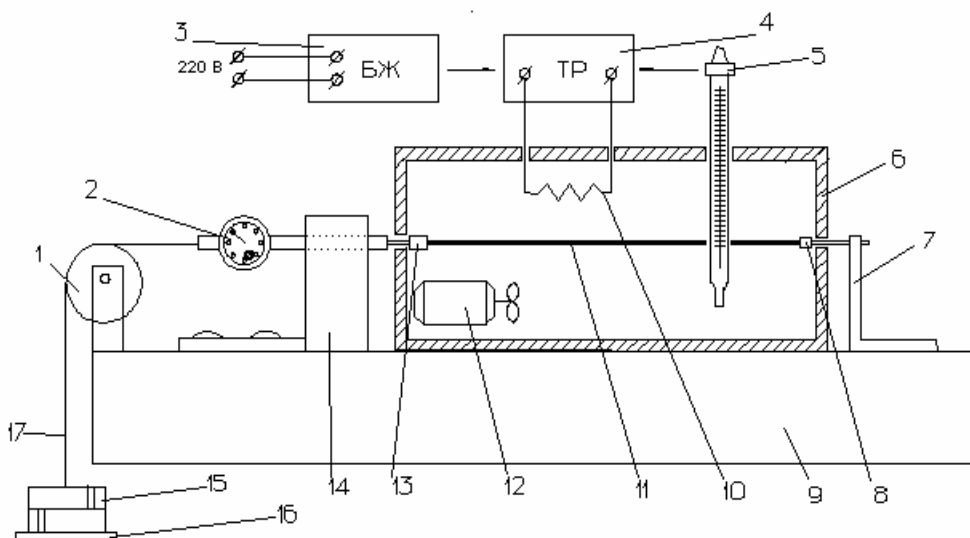


Рис. 2.7. Схема випробувальної установки для вимірювання деформації повзучості плівкових та листових полімерних матеріалів: 1 - шків з опорою; 2 - індикатор годинникового типу; 3 - блок живлення; 4 - терморегулятор; 5 - контактний термометр; 6 - корпус термокамери; 7 - кріплення для нерухомого затискувача; 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.

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 $\pm 0,005$ 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, які пов'язані з необхідністю здійснення одновісного навантаження зразків.



Рис. 2.8. Установа для вимірювання деформації повзучості плівкових та листових полімерних матеріалів: загальний вигляд установки (а), робоча камера (б), випробувальні зразки (в), зразки у затискувачах (г), системи навантаження та вимірювання деформацій зразків (д), система нагріву (е)

Загальна конструкція установки дає можливість досліджувати зразки шириною 10 мм та довжиною 100 мм при робочій температурі до 200°C в умовах рівномірного нагріву вздовж робочої 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; режимі 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).

2.2.2. Вимірювання в'язко-пружних характеристик за допомогою універсальної випробувальної машини

Вимірювання деформації повзучості

Призначення, опис блок-схеми, режимів роботи, клавіатури введення даних та порядок роботи з випробувальною машиною TIRAtest-2151 наведені в розділах 1.1.2 - 1.1.4.

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 до заданого значення мінімального навантаження F1;
- витримки зразка під постійним навантаженням F1.

Далі цикли повторюються. Максимальне число циклів 64000. Значення видовжень зразків зчитують з табло індикації деформації (див. пункт 1.1.2).

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;
- Δ2** - спад сили для розпізнання мікропроцесором моменту розриву зразка, Н.

Порядок введення даних описаний в пункті 1.1.4.

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.

Вимірювання релаксації напружень

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 F_2 ;

- витримки зразка в умовах постійної деформації A_2 , що встановилась після досягнення навантаження F_2 (при цьому зусилля в зразку зменшується);

- розвантаження зразка до заданого значення мінімального навантаження F_1 ;

- витримки зразка в умовах постійної деформації A_1 , що встановилась після досягнення навантаження F_1 (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 $Z_1=Z_2=1$; T_2 дорівнює заданому часу експерименту; T_1 та F_1 вибираємо довільно.

2.3. Побудова кривих повзучості та визначення областей лінійності в'язко-пружних властивостей

2.3.1. Стандартний метод визначення повзучості

Стандарт [68] розповсюджується на пластмаси та встановлює метод визначення повзучості за одновісного розтягу. Суть методу полягає в прикладенні до випробовуваного зразка постійного навантаження розтягом протягом тривалого часу в умовах постійної температури і вологості.

Деформація пластмас при випробуванні на повзучість при розтягуванні характеризує їх здатність чинити опір дії тривалих статичних навантажень. Результати випробувань на повзучість при розтягуванні можуть бути використані для прогнозування поведінки деталей з пластмас (їх деформації) у разі однакових умов випробування і застосування пластмас.

Метод не поширюється на комірчасті пластмаси.

2.3.1.1. Вимоги до зразків та апаратури

Для випробування на повзучість використовують стандартні зразки (див. розділ 1.2.1), якщо в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію немає інших вказівок.

Число зразків, узятих для випробування, для кожного рівня напружень має бути не менше трьох.

Випробувальна машина забезпечує випробування на повзучість при кімнатній або підвищеній температурі і складається з затискачів для кріплення зразка, навантажувального пристрою і приладу для вимірювання видовження.

Навантажувальний пристрій забезпечує швидке і плавне прикладання постійного одновісного навантаження розтягом зразків з похибкою не більше 1%.

Затискувачі здійснюють:

- надійне кріплення зразків без прослизання при прикладеному навантаженні;
- збіг поздовжньої осі зразка з напрямом розтягнення.

Затискувачі не повинен викликати руйнування зразка.

Прилад для вимірювання видовження, контактний або безконтактний, не повинен викликати у зразку додаткових деформацій, подряпин і інших видимих дефектів або нагріву та хімічних змін матеріалу. При випробуваннях до руйнування зразка рекомендується для вимірювання видовження користуватися безконтактною оптичною системою на принципі катетометра і приладом для автоматичної реєстрації часу.

Прилад для вимірювання ширини і товщини зразка має забезпечувати вимірювання з похибкою не більше 0,01 мм. При вимірюванні товщини зразка прилад не повинен чинити тиск на нього більш 0,03 МПа.

Пристрій для нагріву забезпечує проведення випробування при температурах до 300°C з похибкою $\pm 3^\circ\text{C}$, а також градієнт температур по всій довжині робочої частини зразка не більше 1°C, якщо в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію немає інших вказівок.

Рекомендується користуватися приладом для автоматичного запису температури протягом всього випробування.

Спеціальна камера має забезпечувати підтримку постійної вологості з похибкою не більше 5% від заданого значення відносної вологості.

2.3.1.2. Підготовка та проведення випробувань

Проводять попередню підготовку зразків (наприклад, термообробку, кондиціонування до постійної вологості) за умовами, зазначеним у нормативно-технічній документації на конкретну продукцію.

Вимір розміри зразків та нанесення міток описані у пункті 1.2.1. При застосуванні оптичних приладів вимірювання розрахункову довжину на зразку допускається обмежувати за допомогою спеціальних металевих струбцин з вигравіруваними мітками, за якими вимірюють деформацію.

Зразки закріплюють в затискач так, щоб поздовжня вісь зразка збігалась з лінією, що з'єднує точки кріплення захватів на випробувальній машині.

Випробування проводять при температурі $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості $(50\pm 5)\%$. При відсутності автоматичної реєстрації температури, її перевіряють на початку випробування і потім не менше трьох разів на добу до встановлення її значення в заданих межах. Після чого температуру перевіряють рідше.

Якщо не передбачена попередня підготовка зразків, то одночасно з основним випробуванням проводять випробування (вимірювання довжини) контрольного ненавантаженого зразка, властивості якого аналогічні властивостям випробуваного зразка, за умовами, зазначеним у нормативно-технічній документації на конкретну продукцію.

Значення номінального напруження вибирають з наступного ряду величин: 1,0; 3,0; 5,0; 7,5; 10,0 МПа і далі через кожні 5,0 МПа, якщо в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію немає інших вказівок.

До початку прикладання випробувального навантаження для усунення люфтів випробувальної машини до зразка прикладають попереднє навантажен-

ня (не більше 10% від випробувального навантаження), яке не повинне викликати помітного видовження зразка.

Прикладення навантаження до випробувального зразка має здійснюватися плавно, без поштовхів. Швидкість навантаження, що визначається в момент прикладання повного навантаження на зразок, в серії випробувань одного матеріалу має бути однаковою. Час прикладання повного навантаження до зразка не повинен перевищувати 10 с після початку програми навантаження, кращим є час від 1 до 5 с.

Початкове відносне видовження рекомендується визначати через проміжок часу, рівний 10-кратному від часу, необхідного для повного навантаження зразка, якщо в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію немає інших вказівок.

Видовження зразка реєструють приладом автоматичного запису. При його відсутності момент вимірювання видовження підбирають в залежності від кривої повзучості.

Рекомендується вимірювати видовження через 1, 3, 10, 100 год. з похибкою проміжків часу $\pm 3\%$ і так далі з таким розрахунком, щоб логарифм часу змінювався приблизно на 0,5. Допускається вимір видовження за зміни затискної довжини зразка.

Зразок розвантажують і вимірюють відновлення його довжини аналогічно вимірюванню видовження. Якщо при випробуванні до зразка прикладалося попереднє навантаження, то вимірюють відновлення його довжини при дії цього навантаження.

Після закінчення випробування перевіряють появу шийок на зразках після зняття навантаження. Зразки, у яких неможливо встановити момент утворення шийок, а також зразки типів 1 і 2, які руйнуються або на яких утворюються шийки за межами розрахункової довжини, в розрахунок не беруть.

Момент виникнення шийки визначає час втрати жорсткості матеріалу, а номінальне напруження є граничним напруженням, яке протягом наступного часу призведе до втрати жорсткості матеріалу.

2.3.1.3. Обробка результатів

Номінальне напруження σ в МПа обчислюють за формулою:

$$\sigma = \frac{P}{F_0},$$

де P – навантаження, Н; F_0 – початковий поперечний переріз зразка, мм².

Сумарне відносне видовження $\varepsilon(t)$, $\varepsilon'(t)$ і відносне зменшення сумарного видовження при пружному відновленні $\varepsilon_e(t)$, $\varepsilon'_e(t)$ обчислюють за формулами:

–сумарне відносне подовження у часі t $\varepsilon(t) = \frac{\Delta l_0(t)}{l_0}$ або у відсотках

$$\varepsilon' = \frac{\Delta l_0(t)}{l_0} \cdot 100 ;$$

–відносне зменшення сумарного видовження при пружному відновленні в часі t $\varepsilon_B(t) = \frac{\Delta l_1(t)}{l_1}$ або у відсотках

$$\varepsilon'_B(t) = \frac{\Delta l_1(t)}{l_1} \cdot 100 ,$$

де $l_0(t) = l(t) - l_0$ – сумарне видовження, мм; $\Delta l_1(t) = l_1 - l(t)$ – зменшення сумарного видовження, мм; $l(t)$ – розрахункова довжина зразка в заданий момент випробування (момент зняття навантаження), мм; l_0 – початкова розрахункова довжина ненавантаженого зразка, мм; l_1 – розрахункова довжина зразка в часі t після зняття навантаження, мм.

Середню швидкість повзучості при розтягуванні $K_{kt}(t_1, t_2)$ в %·год⁻¹, середню швидкість пружного відновлення $K_e(t_1, t_2)$ в %·год⁻¹, показник повзучості

при розтягуванні $K'_{kt}(t_1, t_2)$ в процентах і показник пружного відновлення $K'_e(t_1, t_2)$ в відсотках обчислюють за формулами:

середня швидкість повзучості при розтягуванні:

$$K_{kt}(t_1, t_2) = \frac{\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot 100 ,$$

середня швидкість пружного відновлення

$$K_{kt}(t_1, t_2) = \frac{\varepsilon_B(t_2) - \varepsilon_B(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot 100 ,$$

показник повзучості при розтягуванні

$$K'_{kt}(t_1, t_2) = \frac{k_{kt}(t_1 - t_2) \cdot (t_2 - t_1)}{\varepsilon_e(t_1)} \cdot 100 = \frac{\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)}{\varepsilon(t_1)} \cdot 100 ,$$

показник пружного відновлення

$$K'_B(t_1, t_2) = \frac{K_B(t_1 - t_2) \cdot (t_2 - t_1)}{\varepsilon_B(t_1)} \cdot 100 = \frac{\varepsilon_B(t_1) - \varepsilon_B(t_2)}{\varepsilon_B(t_1)} \cdot 100 ,$$

де $\varepsilon(t_1)$ і $\varepsilon(t_2)$ – сумарні відносні подовження (безвимірні значення), які спостерігаються відповідно під час t_1 і t_2 ; $\varepsilon_B(t_1)$ і $\varepsilon_B(t_2)$ – відносні зменшення сумарного видовження при пружному відновленні, що спостерігаються відповідно під час зняття навантаження t_1 і t_2 від моменту зняття навантаження.

Модуль повзучості при розтягуванні $E_{kt}(t)$ в МПа і податливість при повзучості при розтягуванні $I_{kt}(t)$ в МПа⁻¹ обчислюють за формулами:

– модуль повзучості за розтягу $E_{kt}(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)}$;

– піддатливість при повзучості за розтягу $I_{kt}(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma}$, $I_{kt}(t) = \frac{I}{E_{kt}(t)}$,

де σ – номінальне напруження, МПа; $\varepsilon(t)$ – сумарний відносне видовження (безрозмірне) в часі t .

Примітка: При випробуванні модуль повзучості і податливість частково залежать від напруження. При визначенні модуля повзучості і податливості, швидкості і показника повзучості необхідно вказати умови їх визначення (температура, вологість, напруження).

Криву повзучості при розтягуванні (пружного відновлення) – залежність між відносним видовженням і часом (рис. 2.9), зображують на графіку в логарифмічних координатах (рис. 2.10). Для визначення результатів випробувань замість кривої повзучості при розтягуванні допускається використовувати криву залежності модуля повзучості при розтягуванні від часу (рис. 2.11) або залежність податливості при повзучості при розтягуванні від часу.

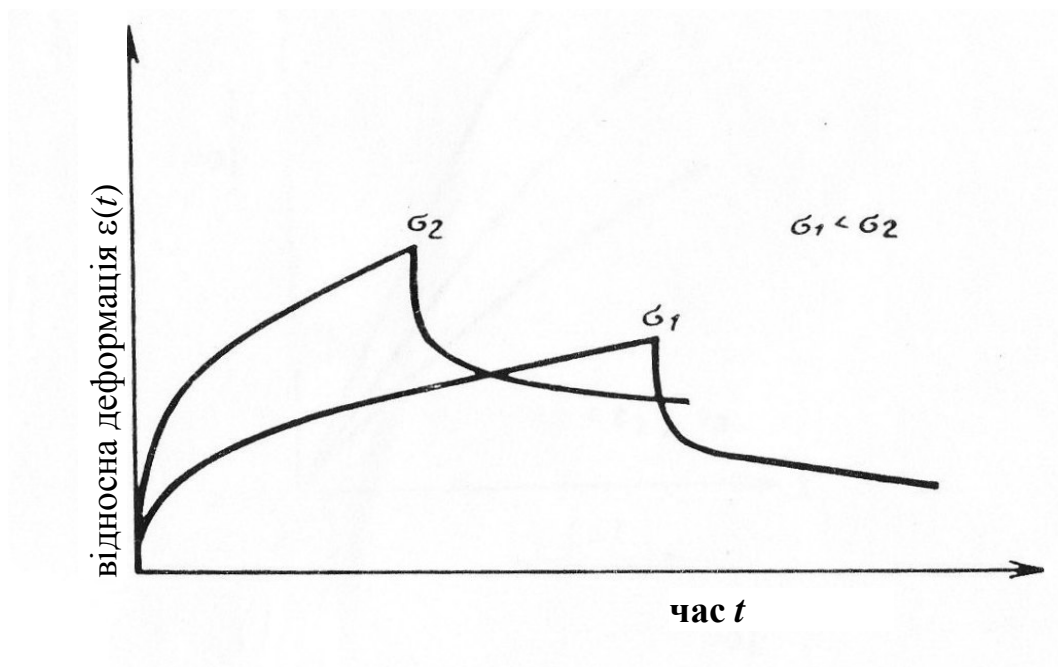


Рис. 2.9. Криві повзучості та пружного відновлення

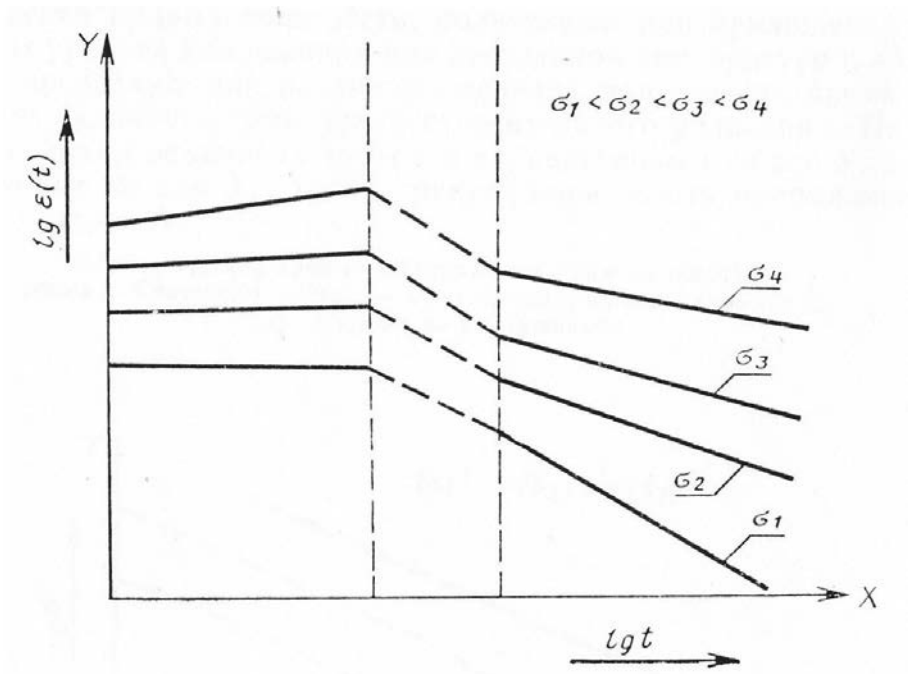


Рис. 2.10. Криві повзучості, розвантаження (пунктир) та пружного відновлення у логарифмічних координатах

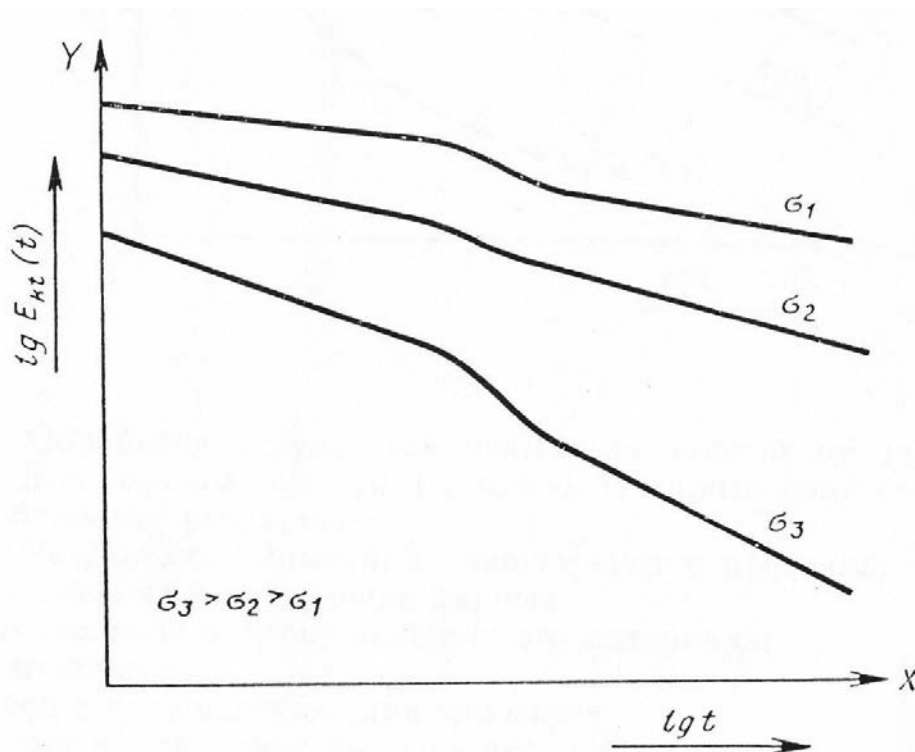


Рис. 2.11. Криві «модуль повзучості - час» у логарифмічних координатах

Ізохронну криву «напруження - сумарне відносне видовження» будують наступним способом. Із серії кривих повзучості, отриманих при прикладанні декількох рівнів напружень за постійної температури і вологості, визначають для різних величин напружень сумарне відносне видовження при заданому часі.

За відповідним значенням напруження σ , нанесеним по осі Y , і сумарним відносним подовженням ϵ , нанесеним по осі X , будують ізохронну криву залежності напруження і сумарного відносного видовження (рис. 2.12).

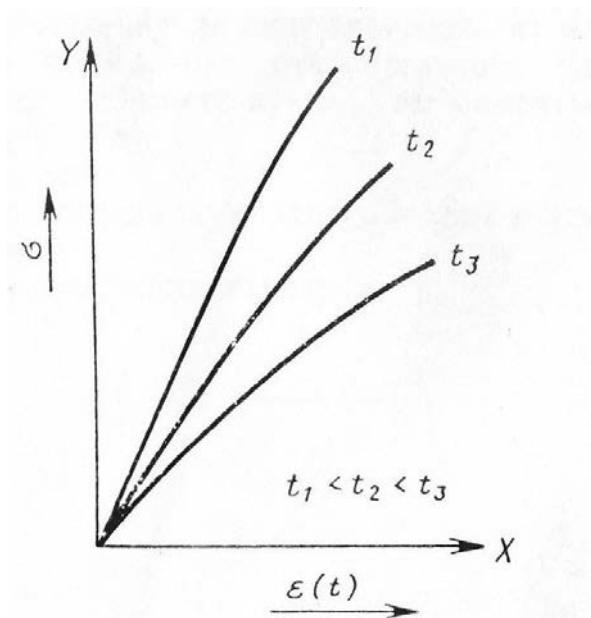


Рис. 2.12. Ізохронні криві «напруження - сумарне відносне видовження»

Ізометричну криву «напруження - час» будують таким способом. Із серії кривих повзучості, отриманих при прикладанні декількох рівнів напружень при постійній температурі і вологості, визначають для різних величин напруження час досягнення заданого сумарного відносного видовження. За відповідними величинам $lg\sigma$ (або σ), нанесеними по осі Y , і lgt , нанесеним по осі X , будують криву залежності напруження і часу (рис. 2.13).

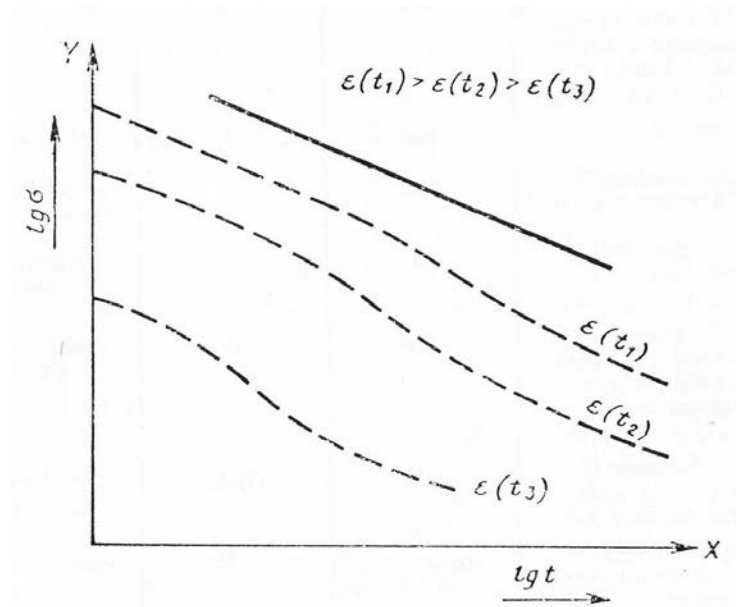


Рис. 2.13. Ізометричні криві «напруження - час» (пунктири) та «напруження - час до руйнування» (суцільна лінія)

Подальша обробка даних та визначення коефіцієнтів рівнянь, що описують в'язко-пружні властивості матеріалів, залежить від подальших цілей досліджень. Для визначення достовірних значень деформацій застосовують статистичну обробку результатів.

Приклади проведення випробувань на повзучість та релаксацію напружень з відповідною обробкою результатів випробувань та зразки протоколів випробувань наведені у Додатку.

2.3.2. Побудова та обробка кривих повзучості, визначення областей лінійності в'язко-пружних властивостей

Для проведення експериментів використовують такі прилади та обладнання:

- випробувальна установка для вимірювання повзучості плівкових та листових полімерних матеріалів;
- універсальна випробувальна машина TIRAtest-2151;
- штангенциркуль з ціною поділки 0,05 мм;
- товщиномір з ціною поділки 0,001 або 0,002 мм.

Для випробувань застосовують зразки у вигляді лопаток згідно з [38] типу 2 або 3. Для досліджень плівкових матеріалів застосовують зразки згідно з [47] 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. пп. 2.2.1, 2.2.2).

Перед проведенням дослідів зразки кондиціонують згідно [44]. 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 т.д. через кожену добу після початку експерименту.

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.

2. Визначають значення функції повзучості (податливості) матеріалу:

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

де $\varepsilon(t)$ – відносне видовження у відносних одиницях.

3. На міліметровому папері будують криві повзучості в координатах $I(t)-t$, вказуючи для кожної кривої температуру випробувань T та діюче напруження σ_K . Типові криві повзучості показані на рис. 2.14.

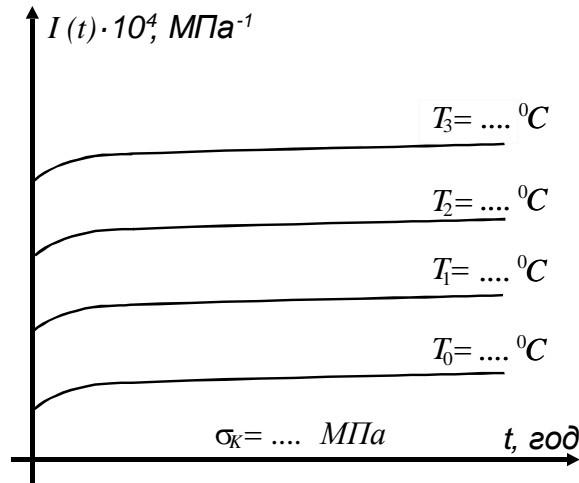


Рис. 2.14. Криві повзучості при різних температурах T та фіксованому напруженні σ_K

Визначають області лінійності в'язко-пружних властивостей матеріалів при різних температурах. Для цього будують ізохронні криві повзучості в координатах $\sigma_K - \varepsilon$ при фіксованому часі вимірювання. Типові ізохронні криві показані на рис. 2.15. 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'язко-пружності матеріалу σ_n , як напруження, за якого не порушується лінійний зв'язок між σ та ε . Якщо явно виражена лінійна ділянка на ізохронній кривій відсутня, за границю лінійної в'язко-пружності приймають напруження, при якому відхилення від лінійності не перевищує заданого значення (наприклад, 10%).

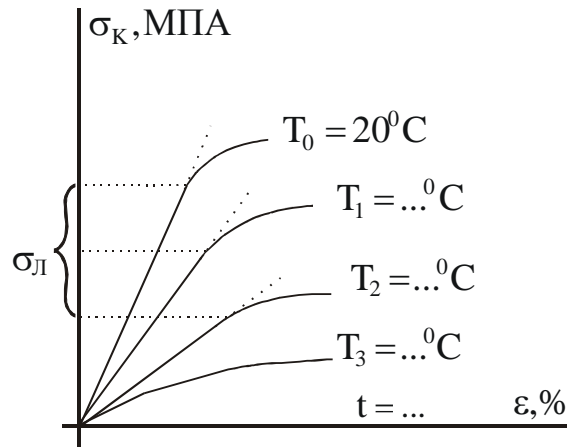


Рис. 2.15 – Визначення областей лінійності в'язкопружних властивостей матеріалів за допомогою ізохронних кривих при різних температурах T

Інший спосіб визначення границі лінійної в'язко-пружності σ_L - це побудова залежностей між податливістю матеріалу I та напруженням σ_k при фіксованому значенні часу спостережень. Типові залежності $I - \sigma_k$ показані на рис. 2.16. Відхилення I від постійного значення свідчить про порушення лінійності в'язко-пружних властивостей матеріалу. Такі залежності будуються також для 4-5 значень часів спостережень.

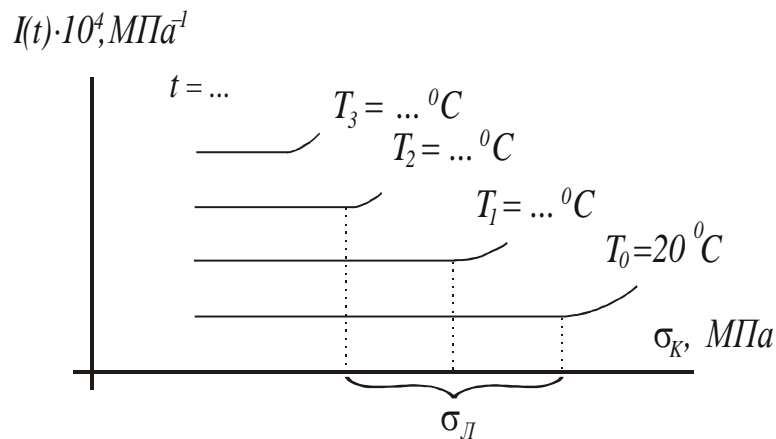


Рис. 2.16. Визначення областей лінійності в'язко-пружних властивостей матеріалів за залежностями $I - \sigma_k$ при фіксованому часі спостережень t та різних температурах T

4. Будують залежності границі лінійної в'язкопружності матеріалу від температури випробувань T при різних значеннях часів спостережень t (рис. 2.17).

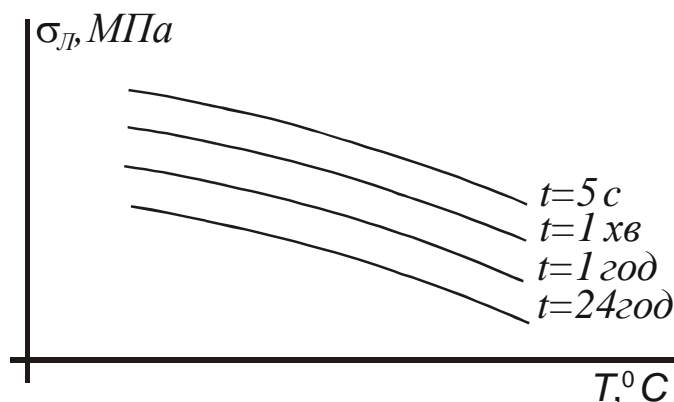


Рис. 2.17. Залежності межі лінійні в'язко-пружності σ_L від температури випробувань *T151*

2.4. Визначення коефіцієнтів рівнянь температурно-часової аналогії та побудова узагальнених кривих повзучості

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.

2.4.1. Визначення температурної функції зсуву

На міліметровому папері будуємо криві повзучості у напівлогарифмічних координатах $I(t) - \ln t$ (рис. 2.18).

За температуру зведення приймаємо $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

- при $T = T_0$ $\ln a_T = 0$;
- при $T = T_1$ $\ln a_T = \ln a_{T1}$;
- при $T = T_2$ $\ln a_T = \ln a_{T2}$
- при $T = T_3$ $\ln a_T = \ln a_{T3}$.

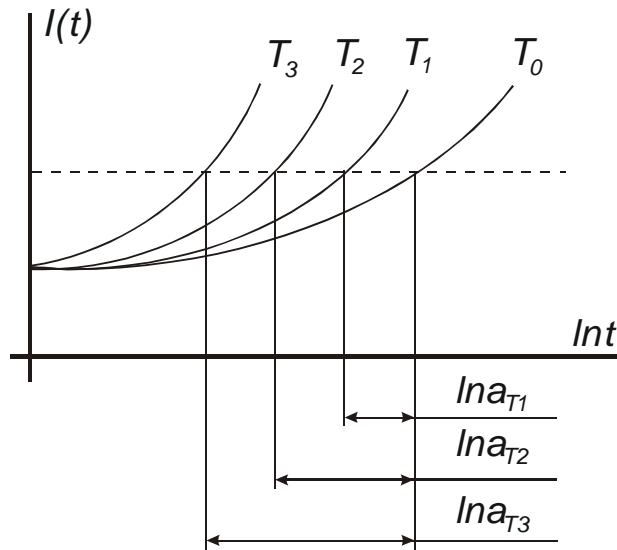


Рис. 2.18 Криві повзучості, побудовані у напівлогарифмічних координатах та схема визначення логарифмів функції a_T

Вимірюємо, як показано на рис. 2.18, 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:

За цими даними будуюмо графік залежності $\ln a_T$ від температури (рис.2.19). Крива, що апроксимує залежність, повинна бути гладка та опукла.

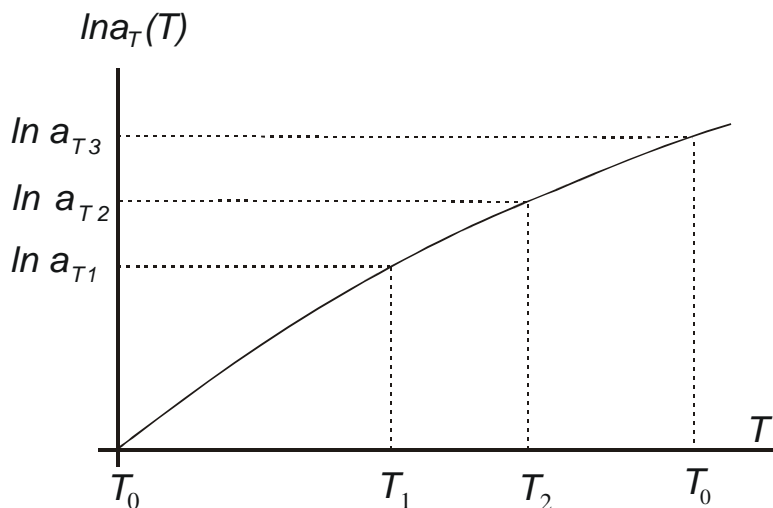


Рис. 2.19. Залежність логарифму функції α_T від температури

2.4.2. Розрахунок коефіцієнтів рівняння ВЛФ та побудова узагальненої кривої повзучості

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 (2.30) 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.

Визначивши коефіцієнти a і 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 показаний на рис. 2.20.

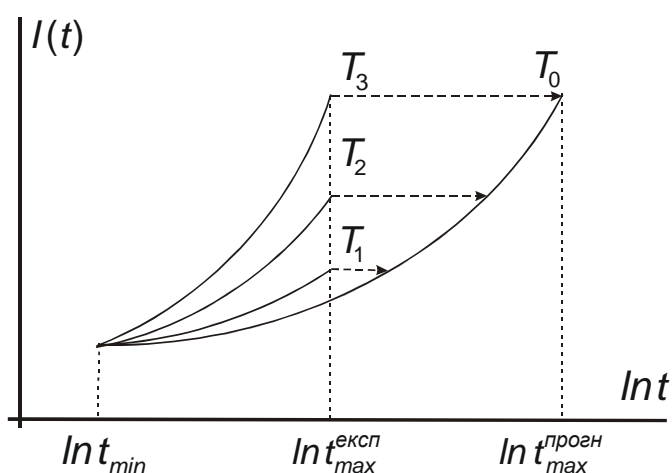


Рис. 2.20. Схема побудови узагальненої кривої повзучості методом горизонтального зсуву кривих повзучості, одержаних за результатами короткочасних експериментів

Введемо такі позначення:

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

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

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

За допомогою наведеного методу можливо:

–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 $\sigma_K \leq \sigma_L$.

2.5. Визначення коефіцієнтів рівнянь повзучості

2.5.1. Узагальнена модель Кельвіна-Фойгта

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 (2.15)

$$I(t) = I_0 + \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \tau_i)], \quad (2.34)$$

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. 2.5а), яка складається з одного пружного та одного в'язкого елементів при $n=1$

$$I(t) = I_0 + I_1[1 - \exp(-t / \tau_1)]$$

або

$$I(t) = I_0 + I_\infty[1 - \exp(-t / \tau_1)]. \quad (2.35)$$

Для часу $t = \tau_1$ з (2.35) 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 визначають графічно за кривою повзучості (рис. 2.21а).

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 приймають два припущення, які підтверджені практикою. Вважається, що:

$$1. I_1 = I_2 = \dots = I_i = \dots = I_n, \quad (2.36)$$

$$2. \tau_1 \ll \tau_2 \ll \dots \ll \tau_i \ll \dots \ll \tau_n. \quad (2.37)$$

Вираз (2.34) зводиться до більш зручного вигляду:

$$I(t) = I_0 + \frac{I_\infty}{n} \left[n - \sum_{i=1}^n \exp(-t / \tau_i) \right]. \quad (2.38)$$

При цьому враховане припущення (2.36), 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 (2.38), з урахуванням припущення (2.37), 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 було враховано, що:

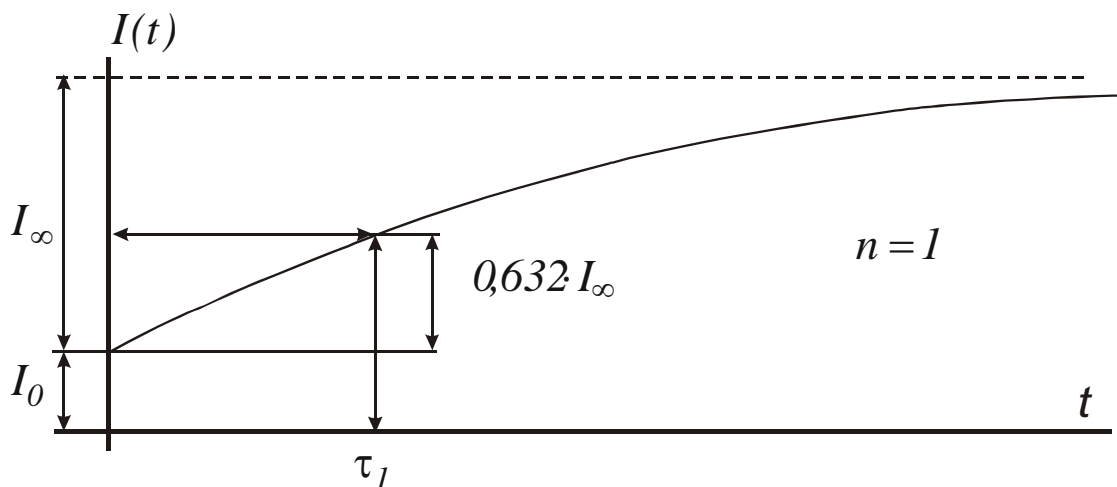
$$\exp\left(-\frac{\tau_i}{\tau_{i+1}}\right) \approx 1, \quad a \quad \exp\left(-\frac{\tau_i}{\tau_{i+1}}\right) \approx 0.$$

Схема графічного визначення τ_1 та τ_2 показана на рис. 2.21б.

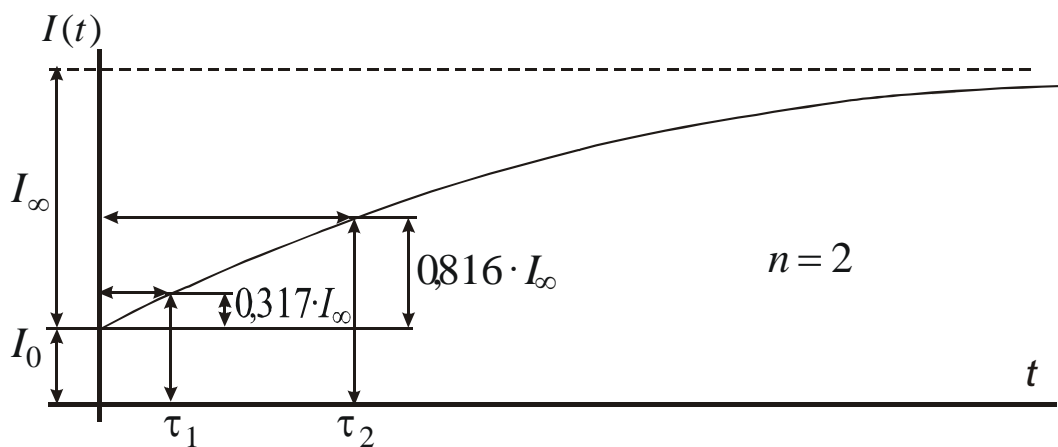
При $n=3$ $I_1 = I_2 = I_3 = I_\infty / 3,$

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

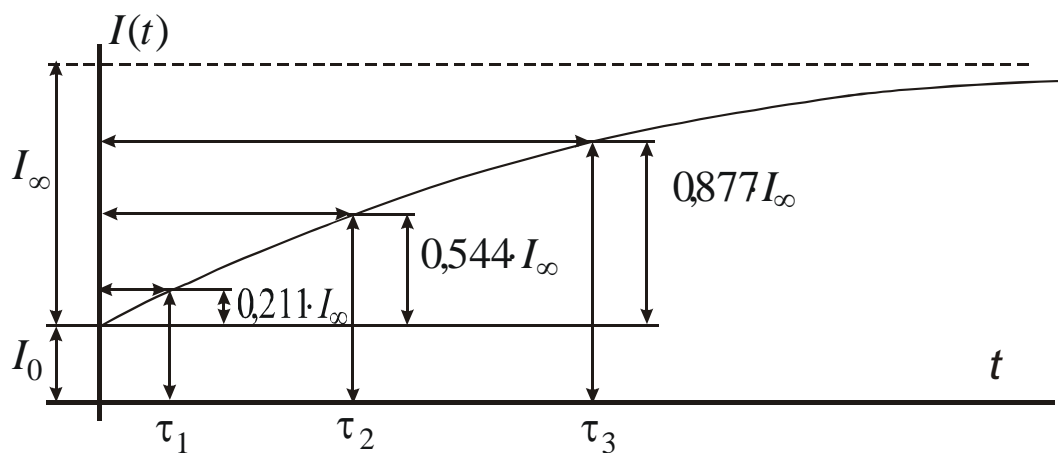
Схема графічного визначення τ_1 , τ_2 і τ_3 показана на рис. 2.21в.



a)



б)



в)

Рис 2.21. Схеми визначення коефіцієнтів рівняння повзучості, що відповідає узагальненій моделі Кельвіна-Фойгта.

2.5.2. Інтегральні рівняння в'язко-пружності

Методика визначення модулів пружності та параметрів функції впливу

Для визначення модулів та функції впливу (2.27), (2.28) використовують графіки, які розміщені у монографії [7]. Модуль пружності та коефіцієнти ядра повзучості визначають шляхом суміщення експериментальних кривих податливос-

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

логарифмічних координатах. Значення параметрів функцій релаксації наведені на рисунках біля кривих повзучості.

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

ну 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 $I(t)$ 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 здійснюють горизонтальним та вертикальним зсувами (рис. 2.22). Вертикальне зміщення дорівнює $\lg E$. Горизонтальне еквівалентне лінійному перетворенню координат t .

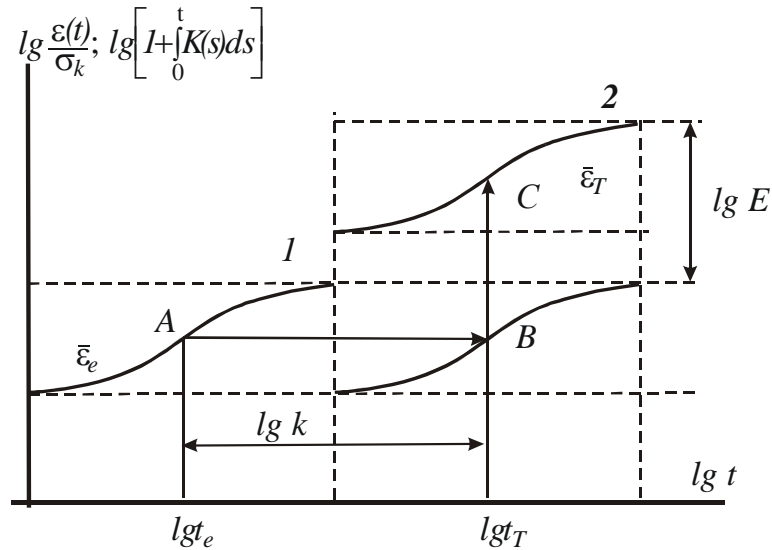


Рис 2.22. Схема визначення параметрів ядра рівняння повзучості

Нехай на рис. 2.22 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 і 2 потрібно спочатку змістити криву 1 праворуч на величину $AB = \lg k = \lg t_T - \lg t_e$. 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 $t_T = kt_e$.

Експериментальні параметри α_e, β_e та A_e знаходять за формулами

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

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

2.6. Побудова кривих та визначення коефіцієнтів рівняння релаксації напружень

2.6.1. Побудова кривих релаксації напружень

Для випробовувань застосовують зразки у вигляді лопаток [38] типу 2 або 3. Для досліджень плівкових матеріалів застосовують зразки згідно [47] 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. пункт 2.2.2 «Вимірювання в'язко-пружних характеристик за допомогою універсальної випробувальної машини. Вимірювання релаксації напружень»).

Перед проведенням дослідів зразки кондиціонують згідно [44]. 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 $\varepsilon = const$, 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.

Реєструють та записують в протокол 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;

Тут $\varepsilon_K = \Delta l / l_0$ - 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 за тієї ж швидкості деформування, як при випробуванні на релаксацію. Спосіб запису діаграми деформування описаний в пункті 1.2.1 «Випробування матеріалів на розтяг. Побудова та обробка діаграм деформування. Характеристики міцності і пружності».

2.6.2. Визначення коефіцієнтів рівняння релаксації напружень

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

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_K} = \sum_{i=1}^n E_i \exp(-t / \tau_i). \quad (2.39)$$

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

$$\tau_i \ll \tau_{i-1}. \quad (2.40)$$

Процес виділення експонент можна розділити на такі етапи.

1. На міліметровому папері будують криву релаксації в координатах $\ln E(t) \sim t$. Екстраполюють лінійну ділянку кривої $\ln E(t) \sim t$ до перетину з віссю ординат (рис. 2.23). Записують рівняння цієї прямої у вигляді:

$$\varphi_n(t) = E_n \exp(-t / \tau_n). \quad (2.41)$$

Визначають $\ln E_n$ за точкою перетину прямої з віссю ординат, а $E_n = \exp(\ln E_n)$. Час релаксації визначається графічно (рис. 2.23) 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. Віднімають з $E(t)$ значення $\varphi_n(t)$, розраховані за виразом (2.41), і на міліметровому папері будують залежність $\ln[E(t) - \varphi_n(t)]$ від часу (рис. 2.24). Екстраполюють лінійну ділянку до перетину з віссю ординат і записують рівняння цієї прямої

$$\varphi_{n-1}(t) = E_{n-1} \exp(-t/\tau_{n-1}). \quad (2.42)$$

Визначають $E(t_{n-1})$ за точкою перетину прямої з віссю ординат. Час релаксації τ_{n-1} визначається графічно (рис. 2.24) або з рівняння

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

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

Обчислення припиняють, 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 прямую лінію (рис. 2.25).

Перейменовують модулі та часи релаксації таким чином:

$$E_1 = E_{n-k}; \quad E_2 = E_{n-k+1};$$

$$\tau_1 = \tau_{n-k}; \quad \tau_2 = \tau_{n-k+1}.$$

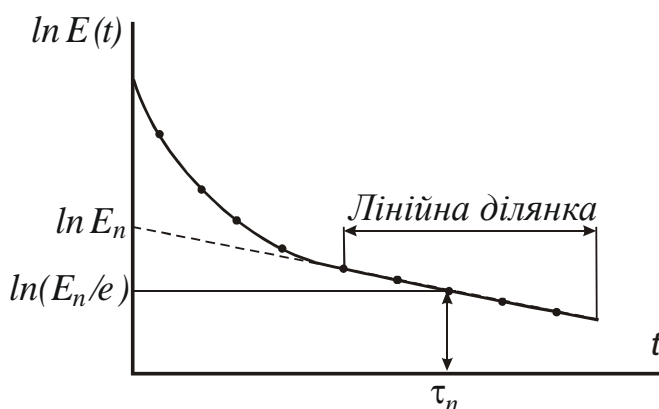


Рис 2.23. Схема визначення E_n та τ_n

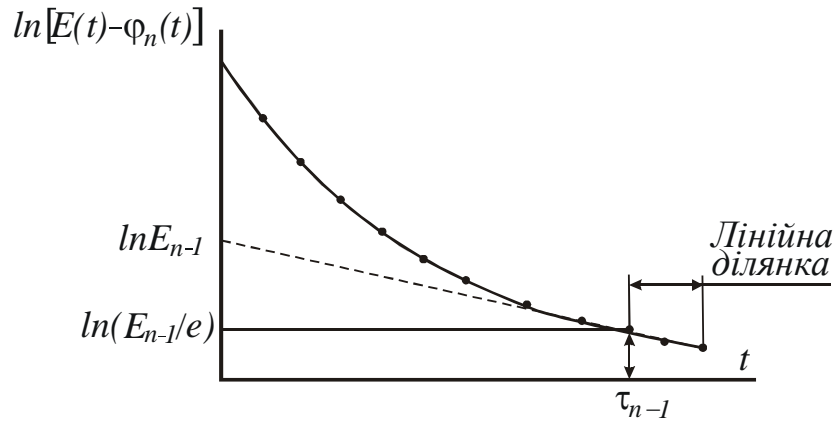


Рис 2.24. Схема визначення E_{n-1} та τ_{n-1}

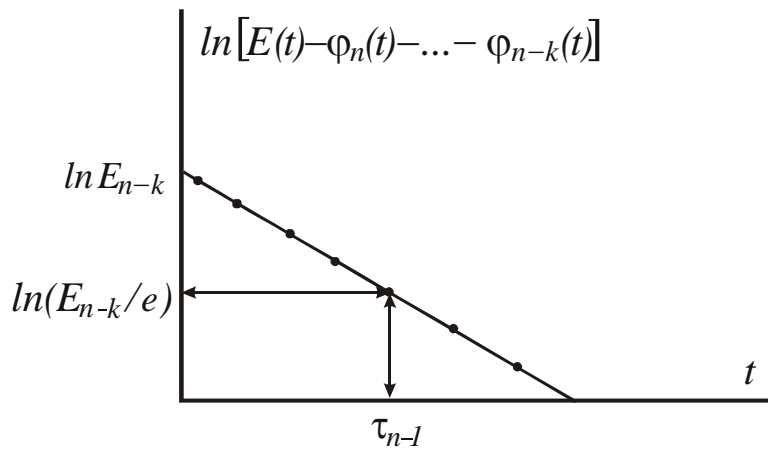


Рис. 2.25. Схема визначення E_{n-k} та τ_{n-k} (останній крок)

За формулою (2.39) обчислюють значення $E(t) = E^P(t)$ (розрахункове значення).

Після цього оцінюють точність апроксимації, розраховуючи відносні помилки

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

для кожного часу спостережень.

Питання для самоперевірки знань за розділом 2

1. Як експериментально одержати криві повзучості та релаксації напружень?
2. Назвіть основні вузли випробувальної установки для вивчення процесів повзучості.
3. Яким способом можливо підтримувати постійну температуру при випробуваннях?
4. Від чого залежить вибір навантаження при дослідженнях повзучості матеріалів?
5. Як експериментально вимірюють деформації повзучості матеріалів?
6. Охарактеризуйте криву повзучості полімеру. З яких ділянок вона складається? Зобразіть типові криві повзучості при різних температурах.
7. Від чого залежать величини деформацій повзучості полімерних матеріалів?
8. Опишіть метод побудови кривих повзучості. Як розраховується податливість матеріалу?
9. Опишіть методику визначення області лінійної в'язко-пружності.
10. Що впливає на величину границі лінійності в'язко-пружних властивостей?
10. Опишіть спосіб побудови ізохронної кривої повзучості. Для чого їх використовують?
11. Як визначити області лінійної в'язко-пружності за кривими релаксації напружень матеріалу.
12. Що називається узагальненою кривою повзучості? Як вона будується?
13. Що таке температура зведення?
14. Опишіть методику визначення параметрів рівняння Кельвіна-Фойгта за кривою повзучості.
15. Що таке релаксація напружень?
16. Опишіть спосіб побудови кривих релаксації напружень. Що впливає на швидкість релаксації?
17. Як вимірюється модуль релаксації в'язко-пружного матеріалу?
18. Зобразіть типову залежність модуля релаксації від часу при дії постійної деформації.
19. Як експериментально визначити параметри рівняння релаксації напружень у матеріалах?
20. З яких основних вузлів складається випробувальна установка для вимірювання повзучості? Опишіть методику експерименту з визначення повзучості.

3. ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

3.1. Властивості полімерів при динамічних навантаженнях

Застосування статичних методів визначення пружних та в'язких характеристик неметалевих матеріалів (конструкційних полімерів, пластмас, композиційних матеріалів з полімерною матрицею) приводить, як правило, до занижених значень, оскільки навіть при незначних навантаженнях в зазначених матеріалах розвиваються високо еластичні деформації з одночасним розвитком релаксаційних процесів.

Точність динамічних методів, як правило, вища, ніж статичних, оскільки вимірюється частота коливань або швидкість звуку у зразку, а не малі переміщення та зусилля. У зв'язку з цим у механіці полімерних матеріалів важливе значення займають динамічні методи вивчення пружно-в'язких властивостей матеріалів у широкому інтервалі температур та частот коливань.

Широко розповсюджені резонансні методи, які дозволяють одержувати частотні залежності динамічного модуля пружності E_{d1} , модуля втрат на в'язке тертя у матеріалі E_2 , а також коефіцієнт в'язкості η . В діапазоні частот 10 ... 500 Гц задовільні результати дає метод вимушених коливань стрижня [16], коли зразок у вигляді консолі піддається коливанням, що збуджуються через затискувач. Вимірювання амплітуди вільного кінця консолі при повільній зміні частоти збудження дає можливість встановити резонансну частоту та ширину резонансної кривої та за цими даними визначити в'язко-пружні характеристики матеріалу.

Серед механічних характеристик пластмас, які визначають придатність їх використання в різних умовах, важливе значення має демпфуюча спроможність (здатність матеріалу поглинати енергію при циклічному деформуванні). Знання декрементів коливань дає змогу розраховувати динамічні характеристики еле-

ментів конструкцій, які в процесі експлуатації потрапляють у резонанс, або зазнають значної вібрації.

Розсіювання енергії в циклічно деформованому матеріалі залежить від амплітуди напруження, частоти циклічної деформації, форми коливань, розмірів зразка та температури. Побічні фактори, що впливають на демпфуючу спроможність – це втрати енергії в затискувачах та тертя між об'єктом та зовнішнім середовищем.

Методи визначення характеристик розсіювання енергії в матеріалі при його циклічному деформуванні засновані на безпосередньому вимірюванні енергії, що розсіюється в зразку (прямі методи), або на одержанні відносних характеристик її розсіювання (опосередковані методи). З прямих методів широко розповсюджені енергетичний, термічний та метод гістерезисної петлі, а з опосередкованих – метод вимірювання резонансної частоти, фазовий метод та метод згасаючих коливань.

На практиці як характеристику демпфуючих властивостей матеріалу використовують логарифмічний декремент коливань δ , що визначається різними методами. Апаратура для визначення декременту коливань придатна і для одночасного знаходження динамічного модуля.

Широко розповсюджені резонансні методи, що дозволяють одержувати частотні залежності динамічного модуля пружності E_1 , модуля втрат E_2 , а також коефіцієнта в'язкості η .

При низьких частотах ($10 \dots 10^2$ Гц) для визначення логарифмічного декременту коливань використовують резонансний метод збудження поздовжніх коливань зразка з додатковою масою. За резонансною частотою поздовжніх коливань визначають модуль пружності, а за віброграмою згасання амплітуд коливань – логарифмічний декремент.

Слід відмітити, що визначення логарифмічного декременту за віброграмою вільних згасаючих коливань достатньо трудомісткий. Застосування сучасних електронних засобів (цифрові фото- та відеокамери, персональні комп'ютери)

дозволяють значно спростити його та скоротити час обробки одержуваної інформації.

В діапазоні частот 10 ... 500 Гц хороші результати дає метод вимушених коливань стрижня, коли зразок у вигляді консолі піддається коливанням, що збуджуються через затискувач. Вимірювання амплітуди вільного кінця консолі при плавній зміні частоти збудження дає можливість встановити резонансну частоту та ширину резонансної кривої, а за цими даними визначити в'язко-пружні характеристики матеріалу.

3.2. Загальні вимоги до проведення вимірювань характеристик вібрації

Стандарт ГОСТ 13731-68 [45] встановлює загальні вимоги до підготовки, проведення вимірювань та оформлення результатів вимірювань коливань серійних машин (наприклад, металорізальних верстатів, двигунів внутрішнього згоряння, електричних машин); коливань на сидіннях трактористів, комбайнерів, на рукоятках ручних машин і на рукоятках ручного керування механізмами або на оброблюваних деталях; коливань на робочих місцях (наприклад, коливань фундаменту або конструкцій, на яких встановлене обладнання, у ряді випадків з віброізоляцією; розподільчих і приладових щитів, на перекриттях будівель) при випробуваннях на підприємстві-виробнику і на підприємстві-споживачі, а також при перевірці дотримання санітарних норм. Перераховані об'єкти вимірювання не являють повного їх переліку, а служать лише прикладами, що пояснюють область застосування загальних вимог до проведення вимірювань.

Виконання цих вимог має визначати відповідність машини або пристрою обмежувальним технічним вимогам до вібрації або нормам допустимих вібрацій для даного типу машин і санітарним нормам.

Стандарт не встановлює вимог до вимірювань, що проводяться в науково-дослідних цілях для поліпшення характеристик розроблених нових конструкцій, в лабораторіях, які досліджують вплив коливань на людину або вивчають вплив металів на установки, в схему яких входять прилади для вимірювання коливань (балансувальні пристрої), та до вимірів, вимоги до проведення яких обумовлені у відповідних стандартах на методи оцінки вібрацій.

3.2.1. Особливості вимірювань характеристик вібрацій

3.2.1.1. Види вимірювань

Загальні вимоги до проведення вимірювань механічних коливань слід виконувати :

а) під час поточних, типових та періодичних випробувань, при яких перевіряються вимоги стандартів, технічних умов для договорів між підприємством-виробником і споживачем;

б) під час контрольних випробувань на підприємстві-споживачеві, при яких перевіряють якість виробів або визначають збереження необхідних характеристик після установки машини або після певного терміну експлуатації, якщо це передбачено стандартном, технічними умовами або договором про поставку;

в) під час екстрених випробувань на підприємстві-споживачеві, пов'язаних з виникненням небажаних коливань, для з'ясування причин їх появи і вироблення заходів для їх усунення;

г) під час перевірки, чи задовольняють машини або установки вимогам санітарних норм щодо вібрацій.

3.2.1.2. Підготовка до вимірювань

Програма вимірювань. Для проведення вимірювань складають програму, в якій повинні бути зазначені:

а) мета та об'єкт випробувань;

б) режим та умови роботи об'єкта випробувань (наприклад, число обертів і навантаження двигуна, навантаження турбогенератора, швидкість ходу трактора і характеристика шляху - зоране поле, ґрунтова дорога тощо; сила натискання на рукоятку перфоратора і вид породи тощо);

в) місця, в яких вимірюють коливання (точки вимірів), параметри вимірювання (зміщення, швидкість, прискорення) і яке їх значення - амплітудне, напіврозмах, ефективне або середньовипрямлене; напрямки осей ox , oy , oz (кути φ_x , φ_y , φ_z). Точки вимірювання повинні бути зазначені на прикладеній до програми схемі об'єкта;

г) тип вимірювальної апаратури, максимальна сумарна похибка вимірювань (для датчиків, підсилювачів, записуючого пристрою) і, якщо можливо, допустимий рівень перешкод (наприклад, від працюючого поруч іншого агрегату) у відсотках до значення корисного сигналу в основній галузі вимірювань;

д) мінімально необхідна кількість вимірювань для всіх або деяких обумовлених датчиків і метод обробки результатів вимірювань;

е) додаткові умови, наприклад, позначка на записі, що відповідає моменту пуску сусіднього агрегату, відмітка на записах сигналів від декількох датчиків у різних записуючих пристроях для синхронізації записів, умови підвіски і закріплення виробів).

Точки вимірювання. Вибір вимірювання визначається метою випробування. Наведені нижче вказівки слугують тільки типовими прикладами.

1. У машинах, де коливання збуджуються неврівноваженістю обертових роторів, рекомендується за точки вимірювання вибирати фундаментну плиту біля підшипника або підшипник вала, тобто місця, де енергія коливань передається фундаменту і навколишнім предметам, а також вал в доступних місцях.

2. При дослідженні коливань фундаменту (двигуна внутрішнього згорання, компресора, верстата), якщо це блок-фундамент, датчики треба ставити так, щоб можна було визначити лінійні і кутові коливання. Для повного запису коливань блок-фундаменту потрібно шість датчиків, але якщо, наприклад, кутові

коливання відсутні, достатньо трьох датчиків, осі чутливості яких спрямовані паралельно і перпендикулярно до осі обертання машини. Датчики (вузол з трьома датчиками) можуть перебувати в будь-якій точці фундаменту.

3. При кутових переміщеннях блок-фундаменту (щодо осей ox , oy , oz , якщо початок координат збігається з центром ваги установки) немає необхідності встановлювати шість датчиків. Наприклад, при перевірці санітарних норм припустимих коливань на робочому місці у дизель-компресора рекомендується вимірювати коливання по трьох осях у куті фундаменту, де обертальні коливання максимальні і відповідні їм дуги, що розглядаються як лінійні переміщення, складаються з лінійними переміщеннями, паралельними осям, а потім повторити вимірювання в діагонально протилежному куті фундаменту (при цьому знаки обертальних коливань змінюються на зворотні). Такі виміри дозволяють визначити і обертальні коливання.

4. Перед записом коливань на робочому місці (на площадці) у машини, що створює коливання (наприклад, близько поршневого компресора), необхідно провести в межах робочого місця (площадки) найпростіші вимірювання коливань, наприклад приставним віброметром, і встановити датчики в місцях найбільших коливань.

5. При запису коливань балок або панелі конструкції стін і підлог заводських приміщень, стін і перекриттів будинків, в яких коливання збуджуються від струсів, що надходять через ґрунт, слід вибирати точки вимірювання, як зазначено в п.1.

Для вертикально розташованих частин (панелей, стін, стійок) рекомендується застосовувати мірний клин чи якийсь інший простий спосіб вимірювання. Крім вимірювання в точках найбільших коливань, необхідно проводити вимірювання на робочих місцях (наприклад, на підлозі біля креслярських дощок, на підлозі біля ніжок верстака для складання приладів тощо), а при перевірці санітарних норм проведення вимірювань на робочих місцях обов'язкове.

6. Для вимірювань коливань на транспорті потрібно розміщувати датчики на сидіннях і на підлозі біля ніг пасажирів та обслуговуючого персоналу. Якщо при випробуваннях визначається ефективність віброізоляції, то датчик встановлюють і на конструкції, на якій змонтоване сидіння (наприклад, на рамі комбайна під сидінням, поблизу точки його кріплення).

7. При вимірюванні коливань ручних машин, рукояток управління механізмами і оброблюваних виробів датчики поміщають в місця контакту рук робітника.

8. У всіх випадках місця установки датчиків мають бути точно нанесені на додану до програми схему досліджуваного об'єкта, щоб зробити можливим порівняння випробувань, що проводяться підприємством з контрольними або повторення чомусь невдалих вимірювань, чи порівняння з об'єктами того ж призначення.

3.2.1.3. Напрямок та компоненти вимірюваних коливань

При виборі напрямку вимірювань коливань необхідно враховувати напрям очікуваних максимальних коливань, можливий напрямок резонансних коливань і спеціальні умови роботи виробу, наприклад, напрямок осі тяги в системі управління. При вимірі коливань датчики рекомендується встановлювати таким чином:

а) при вимірах в точках, зазначених у п.1 попереднього розділу, - у горизонтальному, перпендикулярному до осі та вертикальному напрямках;

б) при вимірах в точках, зазначених у п.4, - у вертикальному напрямку в двох-трьох обраних точках на робочому місці (площадці) і в горизонтальному напрямку в одній з точок;

в) при вимірах в точках, зазначених у п.5, для стійок, вертикальних панелей, стінок - тільки в горизонтальному напрямку;

г) при вимірах коливань на сидіння і на підлозі транспортних машин - за трьома напрямками;

д) на рукоятці ручної машини або рукоятках управління механізмами з віссю чутливості - у напрямку впливу коливань на руки робітника в місцях контакту .

Кількість вимірюваних компонентів та їх спрямування встановлюються залежно від мети вимірювань.

3.2.2. Вимоги до вимірювальної апаратури

1. При проведенні вимірювань та обробці результатів користуються вимірювальною апаратурою, яка широко застосовується.

Призначення загальних вимог, наведених у п.2 та п.3 цього розділу – звернути увагу зацікавлених сторін на ті характеристики апаратури, від яких залежить отримання якісних результатів. Числові значення відхилень від ідеальних характеристик при вимірах повинні бути зазначені підприємством-виробником апаратури.

2. Вимоги до датчиків:

а) вимірювані коливання можуть містити компоненти різної частоти;

б) залежно від мети вимірювань деякі низькочастотні або високочастотні компоненти можуть розглядатися як перешкоди, які необхідно усунути (у таких випадках рекомендується проводити запис, застосовуючи фільтр, що не пропускає частоту перешкод);

в) при підготовці до вимірювань необхідно знати:

- чутливість датчика за даними його калібрування спільно з усім вимірювальним трактом ;

- робочий діапазон частот і амплітуд датчика;

- масу датчика (рекомендується на більше 5% маси досліджуваного об'єкта або, при вимірі місцевих коливань, не більше 5% маси досліджуваного вузла або деталі);

г) датчик має бути забезпечений паспортом і формуляром, в який вносять усі результати калібрування.

3. Вимоги до вимірювальних пристроїв:

а) частотні характеристики вимірювального пристрою мають бути відомими (у досліджуваному діапазоні частот відношення амплітуди виходу до даного сигналу має бути постійним), а застосовувані при вимірах диференціюючі і інтегруючі пристрої не повинні мати відхилень фазочастотної характеристики від прямої пропорційності частоті або від постійного значення в робочому діапазоні;

б) вимірювальний пристрій повинен мати паспорт і формуляр, при цьому у паспорті пристрою має бути зазначений параметр, який він вимірює: пікове (амплітудне), середньовипрямлене або ефективне значення (корінь квадратний з середньоквадратичного).

4. Калібрування датчика спільно з вимірювальним трактом має проводитися обов'язково перед випробуванням. Після випробувань необхідно провести повторне калібрування та перевірку пристроїв, особливо при отриманні результатів, близьких до гранично допустимих.

5 . Кріплення датчиків:

а) жорсткість кріплення інерційного датчика до об'єкта (гвинтами, хомутами, мастикою, клеєм) має забезпечувати таку власну частоту системи з датчика і кронштейна, патрубка з фланцями для кріплення, жорстких хомутів та інших подібних пристроїв, яка була б значно вищою (у 2-3 рази) від максимальної частоти коливань, що підлягає виміру;

б) інерційні датчики типу щупів при випробуваннях повинні знаходитися в постійному контакті з об'єктом вимірювань;

в) установка безконтактних датчиків має забезпечувати сталість зазору між датчиком і об'єктом;

г) не допускається встановлювати пружні прокладки між об'єктом і кронштейном або хомутом кріплення датчика (при порівняльних випробуваннях, коли необхідно з'ясувати ступінь ізоляції, наприклад, забезпечувану різними типами сидінь тракториста, рекомендується проводити вимірювання коливань

при русі трактора, встановлюючи датчик на сидінні без подушки і на сидіння з подушкою, при цьому датчик рекомендується кріпити клеєм, а при установці датчика на подушці можливе кріплення його на металевому листі, накладеному на подушку);

д) площа фланця корпусу датчика має так прилягати до площини кронштейна, щоб кріплення датчика гвинтами або осью шпилькою не деформувало корпус і не знецінювало калібрування.

6. Щоб уникнути появи сторонніх сигналів слід провідку від датчиків до вимірювального пристрою прокладати як можливо далі від проводки електричної мережі, працюючих моторів та інших джерел перешкод. Сполучні кабелі рекомендується екранувати. Допускається не робити цього, якщо провідка завідомо вільна від перешкод (наприклад, вимірювання частоти коливань ґрунту далеко від джерел перешкод). Між датчиком і найближчим до нього кріпленням необхідно залишати коротку вільну петлю у вигляді «знаку запитання».

Струси і перегини кабелю можуть породжувати сторонні сигнали, тому вся провідка від датчика має бути прикріплена до конструкцій хомутами або скобами. Рекомендується застосовувати антивібраційні кабелі.

Екран кабелю слід заземлювати в одній точці вимірювального пристрою, а кабель ізолювати від кріплення відрізками гумової трубки або ізоляційною стрічкою, або ж мати поверх екрана ізоляційне покриття.

7. При вимірюванні коливань важливе значення мають не тільки абсолютні значення вимірюваних величин, а й відносні їх напрямки (синфазність або протифазність): при записі коливань для отримання форми коливань (фундаментні конструкції, підлога пасажирського салону літака і т.п.); при вимірюванні одночасно прямолінійних і поворотних рухів твердого тіла (фундаменту) і т.п.

Необхідно після складання проводки від датчиків до вимірювальних пристроїв перевірити (контрольним імпульсом) правильність підключення датчиків

до пристрою (чи буде переміщення датчиків в одну сторону давати зміщення на записі теж в одну сторону).

Власну частоту системи кріплення з датчиком необхідно оцінювати, збудивши коливання системи легким ударом у напрямку осі чутливості датчика. Запис частоти коливань роблять разом з відміткою часу.

Рекомендується також перевірити відсутність взаємних перешкод між каналами вимірювального пристрою і зовнішніх перешкод від електричної мережі та інших джерел.

3.2.3. Проведення вимірювань та оформлення результатів

1. Перед початком в протокол заносять:

- а) номери датчиків за схемою об'єкта, яка додається до протоколу;
- б) чутливість для кожного датчика та їх номери за схемою об'єкта, яка додається до протоколу, номер датчика, який йому призначений у списку апаратури (для повторного калібрування, якщо таке знадобиться);
- в) номери каналів вимірювальних пристроїв, до яких приєднані датчики;
- г) масштаб позначення часу записуючого пристрою;
- д) дані про випробовуваний об'єкт (наприклад, тип випробовуваного турбогенератора, його число обертів та ін.) і про пристрої, які імітують натуральні умови.

Крім того, в ході вимірів в протокол для кожного кадру (осцилограма для кожного нового пункту умов досліду) записують:

- а) номери датчиків за схемою об'єкта і місце запису його на носії інформації (верхня, середня, нижня);
- б) номери каналів, підсилення (за шкалою пристрою);
- в) назва вимірюваної величини (зміщення, швидкість, прискорення);
- г) умови вимірів для кадру (оберти двигуна, швидкість руху машини, чи працює машина на сусідньому фундаменті і т. д.)

Якщо записуючі пристрої не мають пристрою для нумерації чи ідентифікації кадрів, необхідно вести рахунок кадрів (в тому числі пробних, перевірочних, таких, що відносяться до невдалого досліду та ін.), щоб після закінчення вимірювань можна було встановити відповідність записів протоколу та кадрів (кількість записів протоколу і кількість кадрів має збігатися завжди).

2. Вимірювання на стендах і в умовах експлуатації.

Для можливості співставлення даних, отриманих при вимірюванні на підприємстві-виробнику, з результатами контрольних дослідів на підприємстві-споживачеві необхідно при випробуваннях на підприємстві-виробнику фіксувати на схемі об'єкта місця вимірів, щоб на підприємстві-споживачеві при укладенні програми вимірів були використані ті ж самі місця вимірів.

При багатьох вимірах (наприклад, коливання сидіння транспортної машини) на об'єкт накладають вантажі, які імітують навантаження, положення яких необхідно враховувати при виборі місця установки датчика (поряд з вантажем). При цьому позначення на кресленні треба наносити з максимальною точністю (для врахування в програмах наступних вимірів).

Всі реєструючі та записуючі прилади потрібно захищати від вібрацій, встановлюючи їх на прокладки з губчатої гуми чи іншого м'якого матеріалу, а при дуже великому шумі, якщо можливо, виносити в менш шумне приміщення.

При вимірюванні коливань для визначення вітрозахисних характеристик (наприклад, на кріслах в пасажирському салоні літака) часто виявляється, що звукова ізоляція відіграє роль додаткової віброізоляції. В протоколах вимірів коливань при порівняльних випробуваннях різних типів конструкцій рекомендується відмічати наявність і характер застосованої звукоізоляції.

Оформлення результатів вимірювання

1. При обробленні даних вимірювань періодичних коливань рекомендується не враховувати проміжки, позначки часу на яких розташовані нерівномірно (початок і кінець кадру).

При оформленні результатів обробки даних вимірювання у вигляді таблиць і рафіків позначають, яке значення вимірюваної величини приводиться: пікове (амплітудне), середньо випрямлене чи ефективне.

Якщо проводиться гармонічний аналіз, то, окрім даних аналізу, зазначають і напіврозмах аналізованої кривої. Записи необхідно проводити в масштабі, який би забезпечував при обробці потрібну точність зчитування.

Якщо обробляються дані вимірів випадкових процесів, то, окрім визначення спектральної щільності чи середньоквадратичних значень вимірюваної величини в діапазоні спостережуваних частот, варто виділити частоти і піки гармонійних коливань, які входять в дані вимірювань випадкового процесу, наприклад, власні коливання корпусу трактора, збуджувані поштовхами. При обробці показів цифрових пристроїв, вимагається знайти середньоарифметичну величину на основі повторних випробувань, проведених в однакових умовах, з урахуванням вимог програми вимірів.

2. На основі результатів обробки повинні бути складені таблиці і побудовані графіки амплітуд (напіврозмахів) чи ефективних значень в залежності від основних змінних величин випробування, наприклад, від частоти збудження (кількості обертів), швидкості руху (для транспортних машин), частоти ударів (для пневматичного інструменту).

3. Результати обробки даних вимірювань повинні слугувати доповненням до протоколу випробувань, в який мають входити:

- а) програма вимірів;
- б) оцінка результатів вимірів у відповідності до вимог стандартів, технічних умов і санітарних норм.

При типових випробуваннях необхідно робити аналіз результатів випробування, які відповідають меті вимірів.

3.3. Дослідження властивостей матеріалів та виробів динамічними методами

3.3.1. Стандартний метод коливань консольно закріпленого зразка

За методом, що регламентується [55], визначають динамічні модулі пружності першого та другого роду, коефіцієнтів механічних втрат при резонансних коливаннях консольно закріпленого зразка в умовах нормальної температури при згині та крученні з амплітудами відносної деформацій не менше 10^{-3} при частотах 20–200 Гц.

Межі застосування методу при визначенні коефіцієнта механічних втрат від 0.01 до 0.8. Метод призначений для виконання науково-дослідних робіт.

Суть методу.

1. Визначення динамічних модулів засноване на вимірюванні першої резонансної частоти вимушених коливань при згині або крученні консольно закріплених зразків, що мають прямокутний або круглий поперечний переріз.

2. Визначення коефіцієнтів механічних втрат засноване на вимірюванні ширини резонансної впадини на кривій, що являє собою залежність амплітуди сили, яка збуджує коливання, від її частоти при постійній амплітуді коливань зразка.

Блок-схема установки для вимірювання динамічних модулів пружності та коефіцієнтів механічних втрат зображена на **рис. 3.1**.

1. Для проведення випробувань застосовують:

– систему, що забезпечує збудження коливань при згині та крученні консольно закріплених зразків в інтервалі частот від 20 до 200 Гц та вимірюванні частоти цих коливань з похибкою не більше 0,01 Гц та амплітуди коливань з похибкою не більше 0,05 мм;

– інструмент для вимірювання поперечних розмірів зразків з похибкою не більше 0,01 мм та довжини зразків з похибкою не більше 0,1 мм.

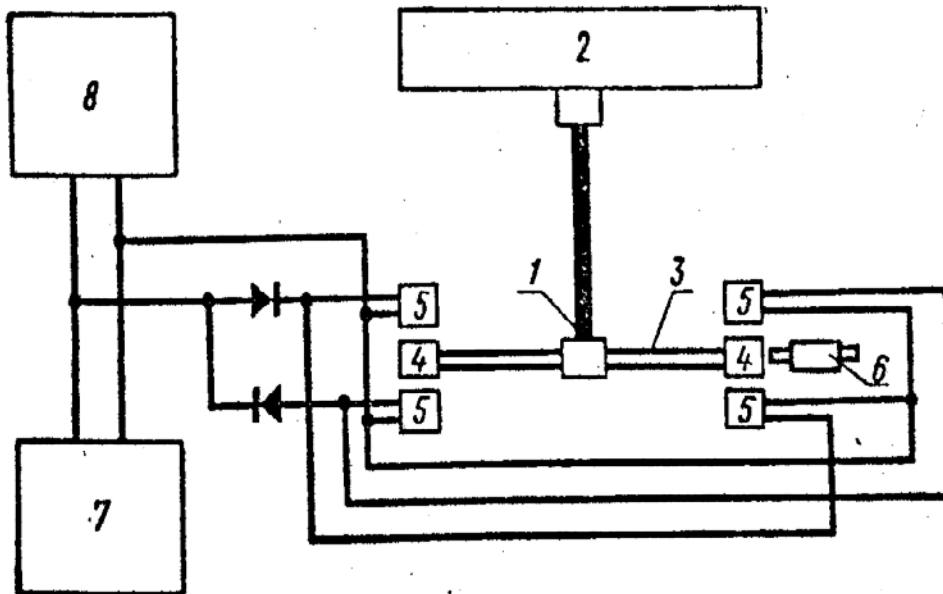


Рис. 3.1. Блок-схема установки: 1 – зразок; 2 – плита; 3 – траверса; 4 – насадки; 5 – електромагніти; 6 – відліковий мікроскоп; 7 – електронний частотомір; 8 – генератор сигналів.

2. Резонансна установка складається з таких частин.

Вузол кріплення зразка. Зразок 1 кріпиться за допомогою цангового або клинового затискувача до масивної плити 2, яка встановлена на амортизатори для зменшення вібрацій. До нижнього кінця зразка за допомогою такого ж затискувача кріпиться траверса 3 з насадками 4 з феромагнітного матеріалу на кінцях, загальна маса якої не більше 80 г.

Збудник коливань. Чотири однакові електромагніти 5 розташовують у вертикальній площині з обох боків від кожної насадки, що дає можливість створювати в зразку коливання чистого згину. Якщо магніти розташовані у горизонтальній площині, то вони створюють крутильні коливання зразка. Для зручності переходу від одного виду деформації до іншого електромагніти можна розташувати на виделках, що обертаються навколо осі, яка збігається з поздовжньою віссю зразка. Можливо встановити вісім електромагнітів (по чотири в горизонтальній та вертикальній площинах) з почерговим підключенням за допомогою комутатору.

Відліковий мікроскоп 6, необхідний для знаходження резонансної частоти та вимірювання величини амплітуди коливань зразка. Мікроскоп розташовується біля однієї з насадок 4, яка має бути достатньо освітлена.

Електронний частотомір 7 необхідний для точного вимірювання частоти коливань.

Генератор синусоїдальних сигналів 8 слугує для збудження коливань у зразку за допомогою електромагнітів, на які подаються напівперіоди синусоїдального напруження.

3. Підготовка до випробувань.

1. Для випробувань застосовують ізотропні або трансверсально анізотропні зразки у вигляді циліндрів та ізотропні або ортотропні зразки у вигляді прямокутних призм.

2. Товщини зразків у вигляді прямокутних призм повинні бути від 2 до 10 мм. Ширини зразків $b = 1,5h$, де h – товщина зразка.

Допускається застосовувати зразки з $b = (1 - 5)h$. Менше значення b/h рекомендується брати для зразків з більшою товщиною, а більше значення b/h – для зразків з ортотропних матеріалів, які вирізані під кутом 45° до осей пружної симетрії.

Діаметр циліндричних зразків може бути від 2 до 10 мм. Довжина зразка вибирається в залежності від його товщини h (для зразків прямокутного перерізу) або діаметра d (для циліндричних зразків) за табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Рекомендації щодо вибору розмірів зразків

Товщина h або діаметр d , мм	від 2.00 до 2.50	від. 2.51 до 3.50	від. 3.51 до 4.50	від. 4.51 до 5.50
Довжина l , мм	від 30 до 40	від 40 до 60	від 50 до 80	від 60 до 100

Товщина h або діаметр d , мм	від. 5.51 до 6.50	від. 6.51 до 7.50	від. 7.51 до 10.00
Довжина l , мм	від 70 до 120	від 80 до 140	від 100 до 150

3. Перед випробуванням вимірюють товщину та ширину зразка по краях та в середині з похибкою не більше 0.01 мм. Робочу довжину зразка (між плитою та траверсою) вимірюють з похибкою не більше 0.1 мм.

4. Зразки перед випробуваннями мають бути витримані при температурі $20 \pm 5^\circ\text{C}$ не менше 3 годин.

4. Проведення випробувань.

1. Зразок надійно закріплюють за допомогою цангового або клинового затискувача верхнім кінцем до масивної плити, а нижнім за допомогою аналогічного затискувача – до жорсткої траверси, яка має на кінцях насадки з феромагнітного матеріалу, що взаємодіють з електромагнітами, які в залежності від їх розташування, збуджують крутильні або згинальні коливання.

Примітка: зразок у вигляді призми прямокутного перерізу розташовують так, щоб деформування відбувалося в площині найменшої жорсткості.

2. Плавно змінюючи частоту генератора, знаходять резонансну частоту ($f_{\text{рез}}$) за максимумом амплітуди коливань, що спостерігається під мікроскопом. Резонансна частота вимірюється частотоміром з похибкою не більше 0,01 Гц та призначена для визначення модуля пружності.

3. Для визначення коефіцієнта механічних втрат вимірюють ширину резонансної впадини (Δf) на рівні, що удвічі більший від резонансного значення сили $P_{\text{мін}}$ при постійній амплітуді коливань зразка (рис. 3.2).

Для цього регулятором вихідного напруження генератора встановлюють амплітуду резонансних коливань зразка A . Потім повільно змінюючи частоту генератора, знаходять частоти (f_1) і (f_2), що відповідають цій самій амплітуді A при подвійній збуджуючій силі ($2P_{\text{мін}}$), для чого збільшують напруження генератора в $\sqrt{2}$ раз.

Ширину резонансної впадини (Δf) розраховують за формулою:

$$\Delta f = f_1 - f_2. \quad (3.1)$$

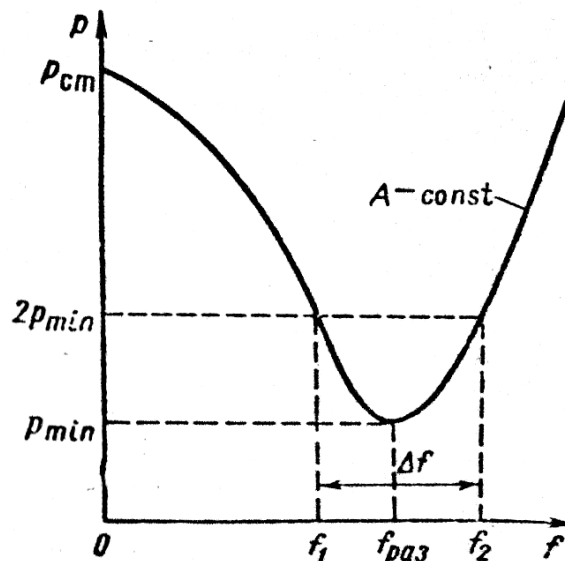


Рис. 3.2. Резонансна впадина та схема визначення характеристик

4. Збільшення удвічі збуджуючої сили на генераторах, що мають ступінчастий атенюатор, зручно проводити, змінюючи вихідне напруження на плюс 3 дБ. В генераторах, що не мають ступінчастих атенюаторів, контроль зміни збуджуючої сили можна здійснювати за допомогою стрілочного приладу, розташованого на лицьовій панелі, або за допомогою амперметра, включеного в ланцюг електромагнітів, або за допомогою дільника напруження з відношенням 0,707.

5. Допускається використовувати метод, оснований на вимірюванні ширини резонансного піку, за умови, що характеристики механічних втрат, що визначаються, не залежать від амплітуди деформації.

6. Не допускається збіг частот коливань при згині та крученні, який легко усувається зміною розмірів зразка.

7. Момент інерції при згинанні I_3 та момент інерції при крученні $I_{кр}$ траверси є постійною величиною для даної траверси та визначається експериментально шляхом крутильних коливань на кут на більше $5 \div 10^\circ$ при її біфілярному підвішуванні на довгих тонких нитях довжиною 3–5 м (рис. 3.3).

При визначенні моменту інерції I_3 траверсу слід підвішувати так, щоб вісь повороту 0-0 (рис. 3.3) збігалася з віссю, навколо якої обертається траверса при згинальних коливаннях зразка, а при визначенні $I_{кр}$ – з віссю крутильних коливань зразка.

Примітка. При рівності головних моментів інерції в будь-якому поперечному перерізі траверси $I_3 = I_{кр}$

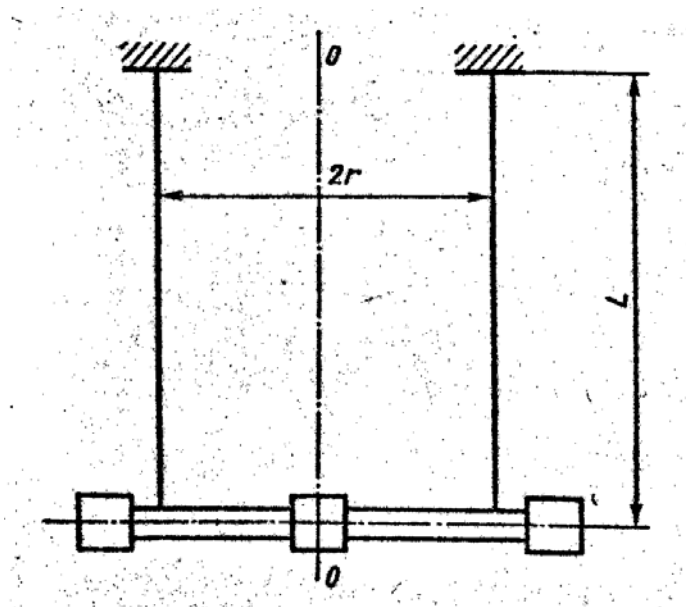


Рис. 3.3. Схема визначення моменту інерції траверси

Відповідний момент інерції (I) розраховують за формулою:

$$I = \frac{mr^2T^2}{4\pi l}, \quad (3.2)$$

де m – маса траверси, кг; r – половина відстані між підвісами, см; l – довжина ниток підвісу, см; T – період коливань, с.

Для визначення періоду коливань величина T після повороту біфілярно підвішеної траверси реєструється протягом 50÷100 коливань. Час вимірюється секундоміром з похибкою не більше 0,1 с.

За результат випробувань беруть середнє арифметичне значення з 10 – 15 вимірювань.

5. Обробка результатів

1. Динамічні модулі пружності (E) и (G) в МПа розраховують за формулами:

для зразка у вигляді призми прямокутного поперечного перерізу

$$E = 48\pi^2 I_3 \frac{l}{bh^3} f_3^2; \quad (3.3)$$

$$G = 4\pi^2 I_{кр} \frac{l}{\beta bh^3} f_{кр}^2, \quad (3.4)$$

для зразка-циліндра

$$E = 256\pi I_3 \frac{l}{d^4} f_3^2 \quad (3.5)$$

$$G = 128\pi I_{кр} \frac{l}{d^4} f_{кр}^2 \quad (3.6)$$

де l – довжина зразка, см; b – ширина зразка, см; h – товщина зразка, см; d – діаметр зразка, см; $f_3, f_{кр}$ – резонансні частоти згинальних або крутильних коливань відповідно, Гц; β – коефіцієнт, що залежить від співвідношення сторін зразків у вигляді прямокутних призм, вибирається за табл. 3.2; I_3 – момент інерції траверси відносно осі її повороту при згинальних коливаннях, Н·м·с²; $I_{кр}$ – момент інерції траверси відносно осі крутильних коливань, Н·м·с²;

Таблиця 3.2. Значення коефіцієнтів β в залежності від співвідношення сторін прямокутного поперечного перерізу

b/h	β	b/h	β
1,00	0,140	2,50	0,249
1,20	0,166	2,75	0,257
1,40	0,187	3,00	0,263
1,60	0,204	3,50	0,273
1,80	0,217	4,00	0,281
2,00	0,229	4,50	0,287
2,25	0,240	5,00	0,291

Примітки:

- допускається знаходження моментів інерції з формул (3.3)–(3.6) за відомими значеннями динамічних модулів матеріалу;
- для точного визначення динамічних модулів пружності їх помножують на коефіцієнт K , що враховує незбігання власних та резонансних частот коливань, і розраховується за формулою:

$$K = 1 + \frac{\eta^2}{4}; \quad (3.7)$$

- формули (3.3)–(3.6) не враховують вплив напруження розтягу від маси траверси.

2. Коефіцієнт механічних втрат η при згинальних та крутильних коливаннях розраховують за формулою:

$$\eta = \frac{\Delta f}{\sqrt{3} f_{рез}}, \quad (3.8)$$

де Δf – ширина резонансної впадини; $f_{рез}$ – резонансна частота.

3. Обробка результатів випробувань проводиться у відповідності з [48].

4. В протоколі, окрім загальних даних (**розділ 7**), мають міститись значення показника, що визначається, для кожного зразка із зазначенням величини максимальних деформацій та частоти коливань.

3.3.2. Метод визначення динамічних властивостей матеріалів за допомогою крутильних коливань

За методом, що регламентується ГОСТ 20812-83 [57], визначають динамічні властивості пластмас за допомогою вільних крутильних коливань у діапазоні частот від 0.1 до 25 Гц при температурах від -150 до +300°C.

Суть методу. Визначення логарифмічного декременту коливань та динамічного модуля зсуву засноване на вимірюванні першої резонансної частоти та амплітуди вільних коливань при крученні консольно закріплених зразків, що мають прямокутний поперечний переріз.

Вимоги до вимірювальної апаратури.

Для проведення випробувань застосовують два типи приладів: *A* та *B*.

Схема приладу типу *A* зображена на рис. 3.4.

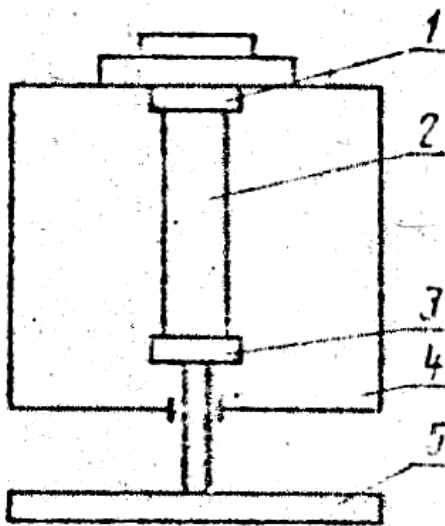


Рис. 3.4. Схема приладу (тип А): 1 – верхній нерухомий затискувач; 2 – зразок; 3 – нижній рухомий затискувач; 4 – камера-термостат; 5 – інерційна деталь.

Інерційна деталь, що являє собою круглий диск з легкого металу з певним моментом інерції, масу та розміри якої вибирають так, щоб напруження розтягу на зразок не перевищувало 0,1 МПа.

Затискувачі повинні забезпечувати надійне закріплення зразка, мати малу масу та дуже малий момент інерції, яким можна нехтувати. Кріплення зразка не повинно мати впливу на результати вимірювання.

Ведучі осі для камери-термостата виготовлюють з матеріалів, що мають низьку теплопровідність. Для випробувань при низьких температурах рекомендується застосовувати самозатяжні затискувачі.

Термостат являє собою камеру з подвійними стінками з автоматичним регулюванням температури та забезпечує розміщення зразків із затискувачами у повітряному або інертному середовищі (в залежності від мети випробувань).

Регулятори температури забезпечують постійну підтримку температури усередині камери-термостата або змінюють її за заданою програмою.

Термостатна камера повинна забезпечувати рівномірне термостатування зразків у всьому діапазоні температур від -150 до $+300^{\circ}\text{C}$, причому швидкість підвищення температури не повинна перевищувати $50^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

Схема приладу типу *Б* зображена на рис. 3.5.

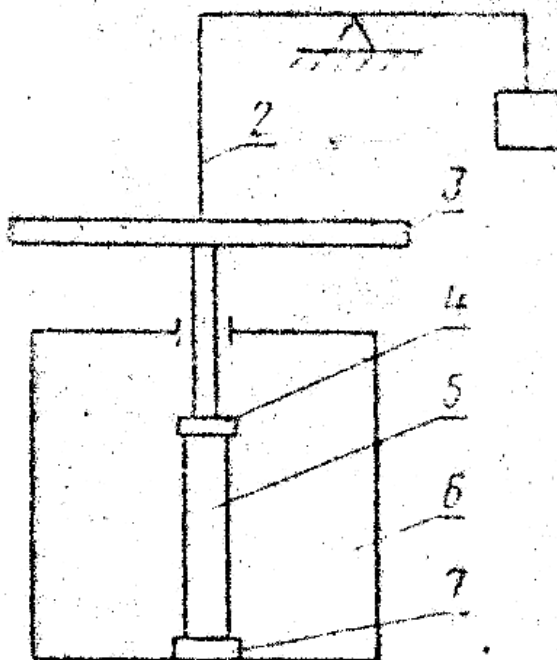


Рис. 3.5. Схема приладу (тип Б): 1 – противага; 2 – дріт; 3 – інерційна деталь; 4 – верхній рухомий затискувач; 5 – зразок; 6 – камера-термостат; 7 – нижній нерухомий затискувач.

Інерційна деталь являє собою круглий диск з моментом інерції від 1 до $1000 \text{ кг} \cdot \text{мм}^2$.

Для урівноваження рухомих деталей приладу встановлена противага. При цьому напруження розтягу на зразку не повинне перевищувати $0,1 \text{ МПа}$.

Затискувачі для зразків аналогічні застосованим у приладі типу *А*.

Якщо моментом інерції верхнього затискувача не можна нехтувати, то момент інерції системи у цілому визначають експериментально.

Камера для витримки зразків аналогічна застосованій у приладі типу А.

4. Прилад для реєстрації коливань має забезпечувати точне визначення частоти та амплітуди і не повинен викликати додаткового затухання коливань в системі. Швидкість реєстрації процесу вибирають в залежності від тривалості коливань таким чином, щоб забезпечити точне вимірювання амплітуди кожного циклу протягом всього процесу згасання коливань. Відносна похибка вимірювання амплітуди коливань не повинна перевищувати 1%.

Вимоги до зразків.

1. Спосіб та режими виготовлення зразків мають відповідати нормативно-технічній документації на конкретну продукцію (матеріал).

2. Для випробувань використовують зразки довжиною 60 мм, шириною 10 мм та товщиною 1 мм. Прилади для визначення розмірів зразків забезпечують вимірювання довжини зразка з погрішністю не більше 0.1 мм, ширини та товщини – не більше 0.01 мм.

Якщо конструкція приладу для випробувань потребує використання зразків інших розмірів, їх вибирають в діапазоні довжини від 30 до 150 мм, ширини від 5 до 15 мм, товщини від 0.05 до 4 мм.

Зразки товщиною від 0.05 до 0.15 мм для запобігання гістерезисним втратам, викликаних впливом повітря, при багаторазових деформаціях випробують у вакуумі.

3. Для випробувань застосовують не менше трьох зразків при кожній встановленій температурі.

Зразки не повинні мати внутрішніх напружень, що викликають короблення, та повинні мати постійний поперечний переріз по всій довжині.

Підготовка до випробувань.

1. Перед випробуваннями вимірюють лінійні розміри зразків. Товщину вимірюють не менше, ніж у п'яти місцях по всій довжині зразка та розраховують як середнє арифметичне.

Найбільше та найменше значення можуть відхилитися не більше, ніж на 3% від середнього значення.

2. Перед випробуваннями зразки кондиціонують за ГОСТ 12423-66 [44] при температурі $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ та відносній вологості $(50\pm 5)\%$ протягом не менше 16 год., якщо в нормативно-технічній документації відсутні інші вказівки.

3. Зразок закріплюють у верхньому та нижньому затискувачах приладу таким чином, щоб поздовжня вісь зразка збігалася з віссю коливальної системи для отримання строго синусоїдальних коливань.

4. Після закріплення зразка вимірюють його довжину між затискувачами з похибкою не більше 0.1 мм.

5. Зразок розміщують у камері-термостаті.

Проведення випробувань.

1. Випробування проводять при температурах в діапазоні від -150 до $+300^\circ\text{C}$. Температура зразка не повинна змінюватися більше, ніж на 0.5°C в інтервалі -150 до $+150^\circ\text{C}$ та не більше, ніж 1°C при температурах вище 150°C .

При випробуваннях зразків в інертному газі швидкість потоку газу має бути постійною.

2. В камері-термостаті встановлюють передбачену вихідну температуру та починають випробування через 20 хв. після досягнення постійної заданої температури.

3. У відповідності до типу приладу в системі збуджують крутильні коливання та після припинення дії збуджувальної сили записують віброграму коливань, реєструють частоту та амплітуду коливань.

Кут кручення не повинен перевищувати 3° в кожний бік.

Обробка результатів.

1. **Логарифмічний декремент механічного затухання (δ)** розраховують за такими формулами:

Схема випробування типу А:

$$\delta = \ln \frac{A_1}{A_2} \quad \text{або} \quad \delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}. \quad (3.9)$$

При використанні двох будь-яких амплітуд коливань:

$$\delta = \frac{1}{n-m} \ln \frac{A_m}{A_n}. \quad (3.10)$$

Схема випробування типу Б:

$$\delta_s = \delta \frac{f^2}{f^2 - f_0^2}, \quad (3.11)$$

де $A_1, A_2, \dots, A_n, A_{n+1}$ – амплітуди коливань, що слідують одне за одним; A_m – амплітуда m -го коливання; A_n – амплітуда n -го коливання; δ – логарифмічний декремент механічного затухання; f – частота коливань системи зі зразком, Гц; f_0 – частота коливань системи без зразка, Гц.

За результат випробувань беруть середнє арифметичне трьох значень.

2. Модуль зсуву (G) в МПа розраховують за формулою:

Схема випробування типу А:

$$G = I \cdot f^2 \left(\underbrace{\frac{1,2 \cdot 10^{-2} \pi^2 \cdot L}{b \cdot h^3 \cdot c}}_{F_{gA}} \right) - \left(\underbrace{\frac{m_A \cdot g \cdot b}{4 \cdot h^3 \cdot c}}_{S_{EA}} \right). \quad (3.12)$$

Схема випробування типу Б:

$$G = \left(4 \cdot 10^{-3} \pi^2 I \cdot f^2 - K \right) \left(\underbrace{\frac{3 \cdot l}{b \cdot h^3 \cdot c}}_{F_{gB}} \right) - \left(\underbrace{\frac{m_B \cdot g \cdot b}{4 \cdot h^3 \cdot c}}_{S_{EB}} \right). \quad (3.13)$$

де I – момент інерції диска, що хитається, кг·мм²; f – частота вільних коливань системи, Гц; b – ширина зразка для випробувань, мм; h – товщина зразка для випробувань, мм; l – довжина зразка між затискувачами, мм; m_A – маса інерційної деталі, включаючи нижній затискувач та нижню вісь, кг; m_B – маса протива-

ги мінус маса інерційної деталі з верхнім затискувачем та верхньою віссю, кг; g – прискорення вільного падіння, мм/с²; c – поправочний коефіцієнт; K – постійна кручення гнучкого дроту, МПа, що визначається за формулою

$$K = 4\pi^2 I f_0^2 \cdot 10^{-3}. \quad (3.14)$$

Якщо $\delta > 1.0$, то F_{gA} необхідно множити на коефіцієнт F_d , який дорівнює:

$$F_d = 1 + \frac{\delta^2}{4\pi^2}. \quad (3.15)$$

Поправочний коефіцієнт c , що залежить від відношення товщини до ширини зразка, розраховують за формулою:

$$c = \frac{3\mu}{16}. \quad (3.16)$$

Значення μ розраховують за формулою:

$$\mu = \left(5,33 - 3,36 \frac{h}{b} \right) \left(1 - \frac{h^4}{125^4} \right). \quad (3.17)$$

При відношенні товщини до ширини менше 0.4

$$c = \left(1 - 0,63 \cdot \frac{h}{b} \right). \quad (3.18)$$

При випробуваннях за **типом Б** величиною K можна знехтувати, якщо

$$4 \cdot \pi^2 \cdot I \cdot f^2 \geq 100 \cdot K.$$

За результат випробувань беруть середнє арифметичне трьох визначень.

Результати випробувань записують в протокол, який має містити такі дані:

- найменування та марку матеріалу;
- тип схеми випробування (А або Б);
- кількість зразків для випробувань;
- спосіб виготовлення зразків;

- розміри зразків;
- величини модуля зсуву G та логарифмічного декременту δ , графіки залежностей модуля зсуву та логарифмічного декременту від температури, якщо випробування проводилися при різних температурах;
- дату випробувань.

3.4. Обладнання для вимірювання динамічних характеристик матеріалів

3.4.1. Електродинамічний стенд ведс-10

Метод вимушених поперечних коливань стрижня реалізований при створенні однієї з установок для дослідження динамічних характеристик полімерних і композиційних матеріалів.

Установка (рис. 3.6) складається з вібратора 1 на основі електродинамічного стенда ВЕДС-10 і периферійної апаратури. На котушки вібратора через блок підсилення 10 з генератора синусоїдальних коливань 11 подається змінна напруга, частота якої вимірюється частотоміром 13. Підмагнічення нерухомої частини вібратора здійснюється блоком 12. Амплітуду прискорення коливань стола 2 вібратора 1 вимірювали датчиком 6 і блоком 9.

До столу 2 жорстко прикріплений стрижень 3 і затискувач 4. Зразок 5 жорстко закріплений в затискувачі 4. До кінця зразка прикріплений знімний додатковий вантаж 7. Вимірювання амплітуди коливань зразка здійснюють катетометром В-630 (вимірювач 8).

Технічні характеристики установки:

- діапазон частот від 4 Гц до 40 кГц;
- максимальне прискорення 10g;
- точність вимірювання амплітуди коливань $\pm 0,01$ мм.

Зразки для випробувань мають вигляд брусків прямокутного поперечного перерізу товщиною h , шириною b та загальною довжиною L .

Масу зразків m вимірюють за допомогою аналітичних ваг АДВ-200М з точністю $\pm 0,1$ мг. Густину матеріалу визначають за формулою

$$\rho = \frac{m}{hbL}. \quad (3.19)$$

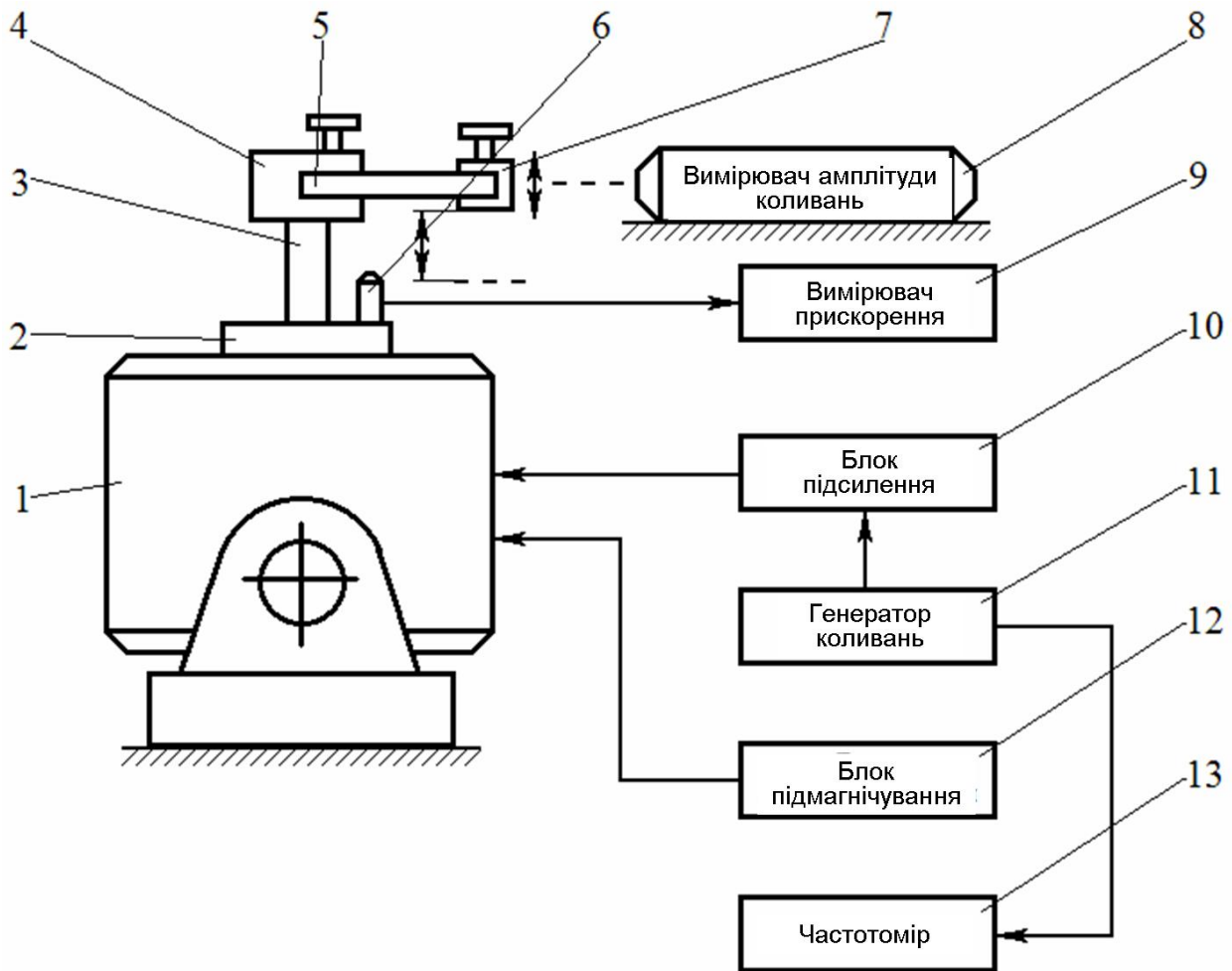


Рис. 3.6. Електромеханічна схема установки для дослідження динамічних характеристик матеріалів при згинальних коливаннях: 1 - електродинамічний стенд ВЄДС-10; 2 - стіл вібратора; 3 - стрижень вібратора; 4 - затискувач для зразка; 5 - досліджуваний зразок; 6 - п'єзокерамічний датчик; 7 - змінний додатковий вантаж; 8 - оптична система катетометра В-630; 9 - блок вимірювання вібрацій; 10 - блок посилення; 11 - блок генератора синусоїдальних коливань; 12 - блок підмагнічування; 13 - електронний частотомір

Розглянемо методику випробувань та розрахунків динамічних характеристик при відсутності додаткового вантажу 7.

Повільно змінюючи частоту генератора 11, домагаються максимальної амплітуди коливань a_{\max} зразка, якій відповідає резонансне значення частоти ν_r (рис. 3.7).

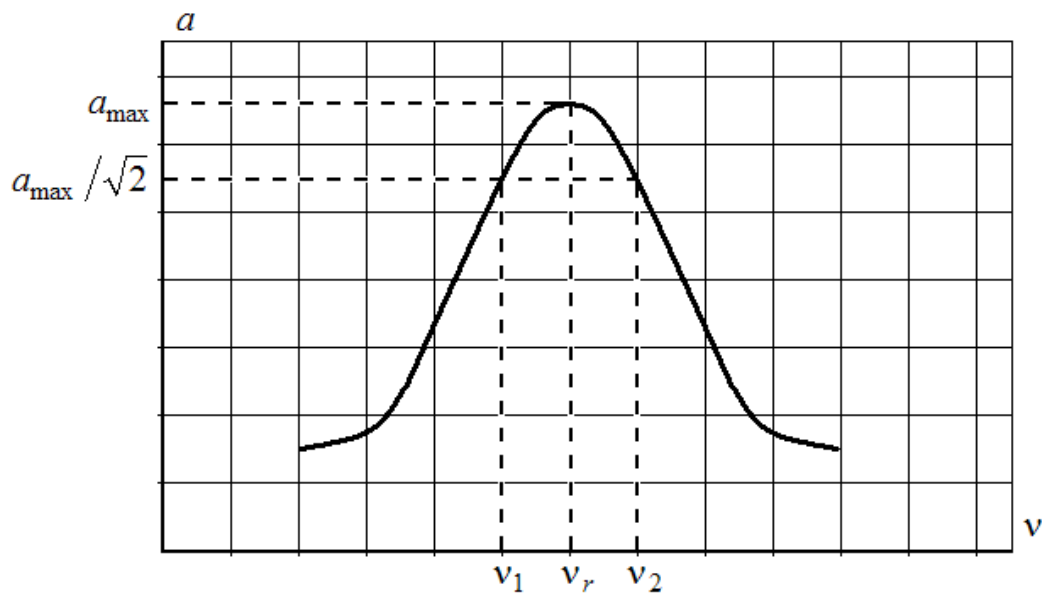


Рис. 3.7. Резонансна крива, побудована в координатах а (амплітуда) – ν (частота)

Після цього встановлюють частоту ν_1 або ν_2 , за якої амплітуда зменшується до $1/\sqrt{2}$ резонансного значення. Таким чином, ширина частотної смуги дорівнює $\Delta\nu = 2 \cdot (\nu_r - \nu_1)$ або $\Delta\nu = 2 \cdot (\nu_r - \nu_2)$. Потім визначають динамічний модуль пружності E_1 , модуль втрат E_2 , коефіцієнт динамічної в'язкості матеріалу η и тангенс кута механічних втрат $tg\delta$.

Враховуючи, що зразки мають прямокутний поперечний переріз та відношення ширини до довжини не більше 1/10 (при цьому не порушується справедливність хвильового рівняння), формули для визначення E_1 , E_2 та η мають вигляд:

$$E_1 = 38,3 \frac{\rho l^4}{h^2} \left[\nu_r^2 + 0,125(\Delta\nu)^2 \right] \cdot 10^{-9}. \quad (3.20)$$

$$E_1 = 38,3 \frac{\rho l^4}{h^2} \nu_r \cdot \Delta \nu \cdot 10^{-9}. \quad (3.21)$$

$$\eta = \frac{E_2}{2\pi \nu_r}. \quad (3.22)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{E_2}{E_1} \cdot 100\%. \quad (3.23)$$

Тут l – робоча довжина зразка (відстань від місця закріплення до вільного торця зразка).

У вищенаведених формулах величини мають такі E_1, E_2 – МПа; ρ – $[\text{г}/\text{см}^3]$; $\nu_r, \Delta \nu, \nu_1, \nu_2$ – Гц; h, l – мм.

3.4.2. Установа для дослідження динамічних характеристик матеріалів

Електромеханічна схема стенда для дослідження динамічних характеристик матеріалів при поперечних коливаннях консольно закріплених зразків зображена на рис. 3.8. Стенд дозволяє проводити випробування у діапазоні температур від 20 до 100°C.

Установа складається з електромагнітного вібратора 1, коливання якого збуджують сигналом з генератора змінного напруження 12. Вимірювання частоти сигналу з генератора проводиться електронним частотоміром 13.

До вібратора прикріплений стрижень 3 та затискувач 6. Зразок 9 жорстко закріплений у затискувачі 6. Вимірювання амплітуди коливань зразка проводиться катетометром 11 через оглядове вікно 10.

Рухомий затискувач 6 зі зразком 9 поміщений в термокамеру 4. В якості нагрівача 9 використаний керамічний резистор потужністю 10 Вт. Вентилятор 2 призначений для перемішування повітря у камері. Необхідну температуру підт-

римують за допомогою електроконтактного термометра 5 та блока автоматичного підтримання температури 7.

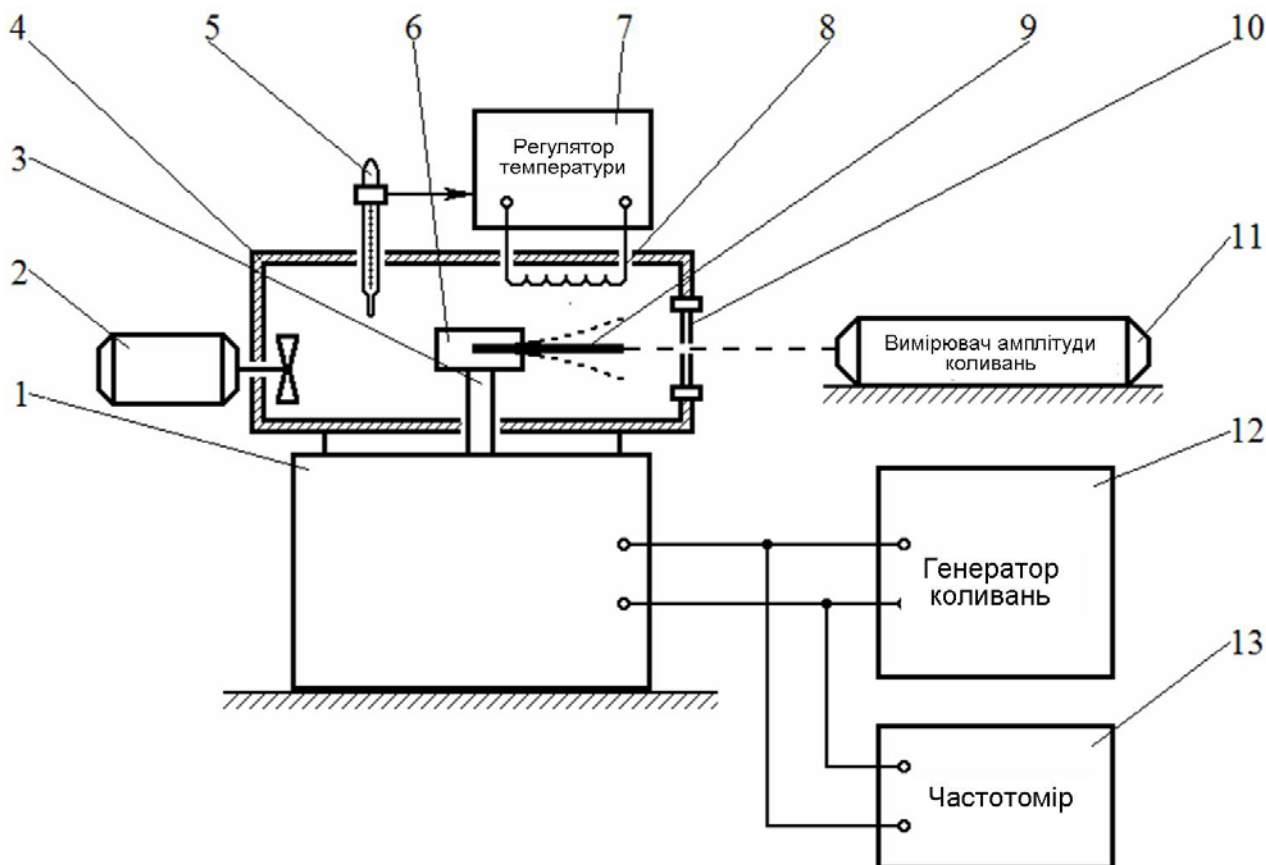


Рис. 3.8. Електромеханічна схема установки для дослідження динамічних характеристик матеріалів при різних температурах: 1 – електромагнітний вібратор; 2 – система переміщення повітря; 3 – стрижень вібратора; 4 – термокамера; 5 – контактний термометр; 6 – рухомий затискувач; 7 – блок живлення нагрівача; 8 – нагрівальна спіраль; 9 – зразок; 10 – оглядове вікно; 11 – оптична система катетометра В-630; 12 – генератор коливань; 13 – електронний частотомір

За необхідності проводити експеримент при знижених температурах використовується суміш сухого льоду та етилового спирту, яка поміщається на дно камери.

Методика випробувань та розрахункові формули повністю збігаються з наведеними у попередньому розділі.

3.4.3. Установа для дослідження динамічних властивостей пластмас у розширеному діапазоні температур

Для дослідження динамічних характеристик конструкційних пластмас при температурах $-80 \dots +80^{\circ}\text{C}$ розроблена та створена установа, в якій реалізовано метод вимушених коливань консольно закріпленого стрижня.

Установа (рис. 3.9) складається з вібратора 20, звукового генератора ГЗ-34, електронного частотоміра Ф599, термо- та кріокамери 11, системи регулювання та підтримання температури, датчика контролю амплітуди коливань стрижня 1 та мілівольтметра ВЗ-2А, що реєструє амплітуду. Постійний магніт 19 нерухомо закріплений в корпусі вібратора 20. Стрижень 16 та котушка вібратора 18 за допомогою пружних елементів 17 з термообробленої берилієвої бронзи розміщені в полі постійного магніту таким чином, що можуть здійснювати вертикальні коливання.

Стрижень має спеціальний затискувач 12, в якому закріплений досліджуваний зразок 14. На котушку вібратора подають напруження змінної частоти від генератора ГЗ-34. Амплітуду зразка, що коливається, виміряють за допомогою відлікового мікроскопа 15.

Сталість амплітуди коливань стрижня у процесі експерименту контролюють датчиком 1, що являє собою пружну балочку з наклеєними напівпровідниковими тензорезисторами. Живляться датчики через дільник напруження від джерела БСП-24/1. Вихідний сигнал реєструють мілівольтметром ВЗ-2А.

Зразки при заданій температурі витримують в термо- та кріокамерах, що знаходяться на верхній кришці вібратора. Необхідну температуру підтримують за допомогою електроконтактного термометра 10 та блока автоматичного регулювання температури з точністю $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

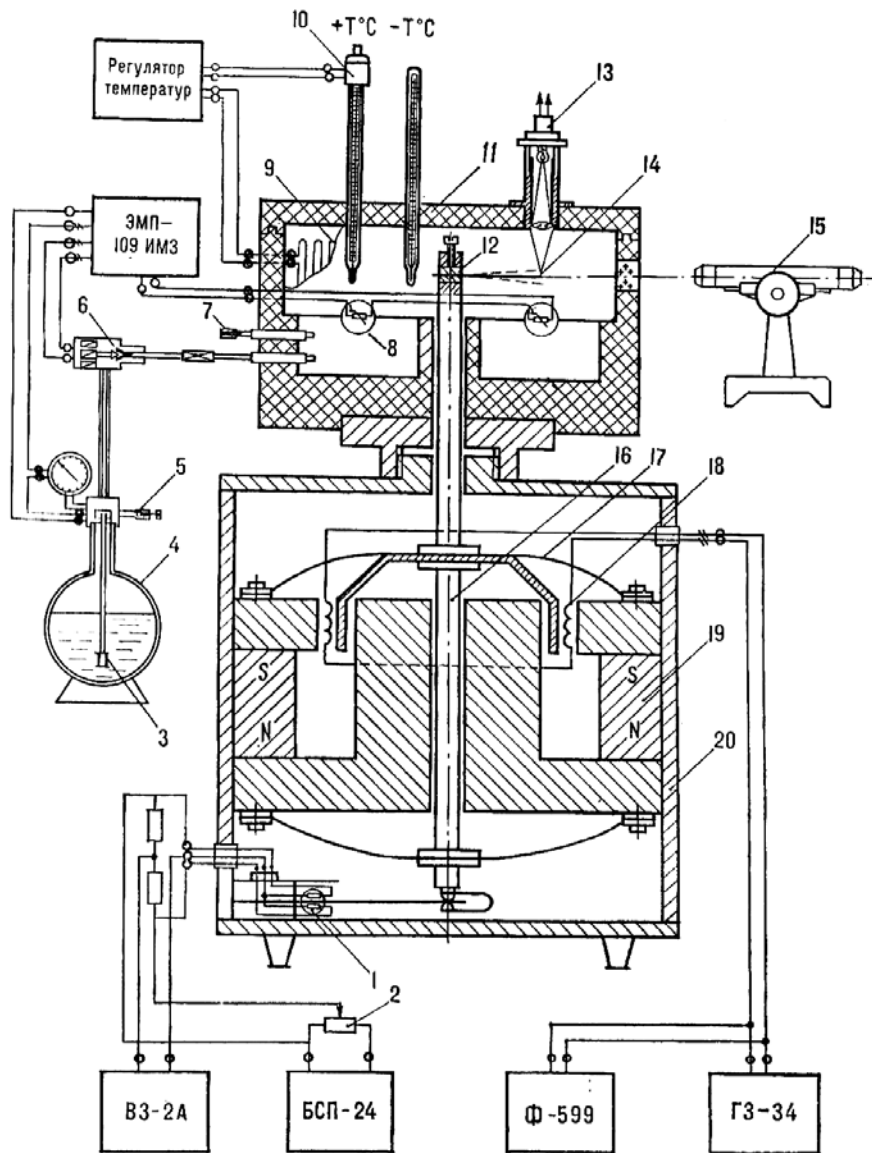


Рис. 3.9. Електромеханічна схема установки для дослідження динамічних характеристик пластмас при поперечних коливаннях: 1 – тензорезисторний датчик–перетворювач для реєстрації та задання постійної амплітуди збуджувальних коливань; 2 – дільник напруження; 3 – спіраль для підігріву азоту; 4 – посудина Дьюара з рідким азотом; 5 – вентиль; 6 – електромагнітний клапан; 7 – запобіжний клапан; 8 – термометр опору; 9 – нагрівальні елементи; 10 – електроконтактний термометр; 11 – термо- та кріокамера; 12 – спеціальний затискувач; 13 – освітлювальна система; 14 – зразок; 15 – мікроскоп; 16 – стрижень вібратора; 17 – пружні елементи; 18 – котушка вібратора; 19 – постійний магніт; 20 – вібратор; ЭМП-109 ИМЗ – електронний міст; ВЗ-2А – мілівольтметр; БСП-24 – стабілізоване джерело живлення; Ф-599 – електронний частотомір; ГЗ-34 – звуковий генератор

Плавно змінюючи частоту генератора, домагаються максимальної амплітуди коливань зразка, якій відповідає резонансне значення частоти ν_r . Після цього встановлюють частоту ν_1 або ν_2 , за якої амплітуда зменшується до $1/\sqrt{2}$ резонансного значення. Таким чином, ширина смуги на резонансній кривій дорівнює $\Delta\nu=2(\nu_r-\nu_1)$ або $\Delta\nu=2(\nu_r-\nu_2)$. Потім визначають динамічний модуль пружності, модуль втрат та коефіцієнт в'язкості матеріалу.

Враховуючи, що зразки мають прямокутний поперечний переріз та відношення ширини до довжини зразка не більше 1/10 (при цьому не порушується справедливість хвильового рівняння), можна використовувати формули для визначення $E_{д1}$, E_2 и η , наведені в попередньому розділі.

Використовуючи динамічний метод, вивчають пружні характеристики в діапазоні частот 20 ... 130 Гц, що досягається зміною довжини робочої частини зразків, які піддаються випробуванням, від 8 до 18 мм.

Оскільки товщина зразків мала, то на результат експериментів можуть вплинути втрати, пов'язані з тертям зразків з повітрям. Для визначення цих втрат зразки полімерних плівок (товщина 0,024 мм) випробували у повітрі, а також у вакуумній камері при тиску 1,3 МПа. Порівняння середніх значень модулів пружності показало, що при випробуваннях у повітрі вони на 3 ... 5 % більші, ніж у вакуумі.

Подальші випробування проводять без вакуумування системи, оскільки погрішність результатів незначна. За нормальних умов проведення експерименту спрощується та потребує менше часу.

3.4.4. Установа для досліджень при поздовжніх коливаннях зразків

Для дослідження динамічних характеристик плівкових полімерних матеріалів при поздовжніх коливаннях створена установка (рис. 3.10), що працює за методом збудження коливань зразків з додатковою масою. Принцип її дії базу-

ється на реєстрації вимушених резонансних та вільних коливань, а також електронному логарифмуванню амплітуди коливань у часі.

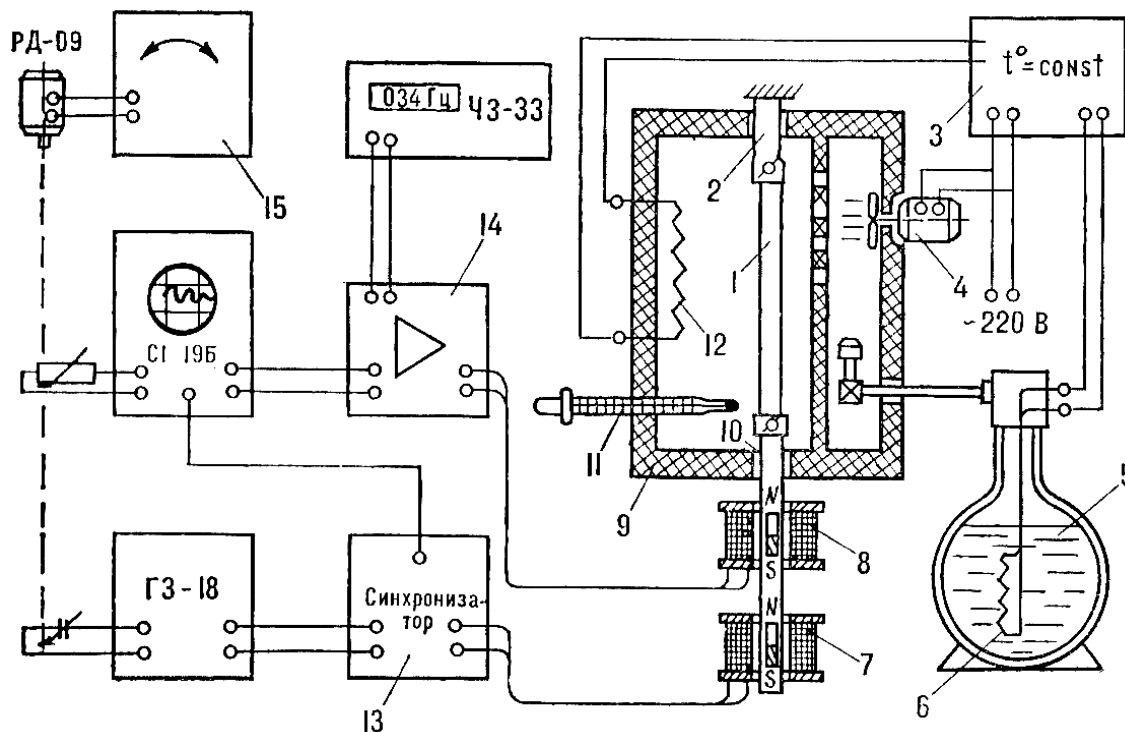


Рис. 3.10. Електромеханічна схема установки для дослідження динамічних характеристик полімерних плівок при поздовжніх коливаннях: 1 – зразок; 2 – верхній затискувач; 3 – регулятор температури; 4 – вентилятор; 5 – посудина Дьюара с рідким азотом; 6 – випарник азоту; 7, 8 – соленоїди; 9 – камера; 10 – інерційний вантаж з постійними магнітами; 11 – термометр; 12 – нагрівальний елемент; 13 – синхронізатор; 14 – логарифмічний підсилювач; 15 – реверсивний устрій

На установці реалізують поздовжні коливання зразків з полімерних плівок при циклічно однорідному лінійному напруженому стані. Для дослідження розсіювання енергії за методом динамічної петлі гістерезису передбачений змінний жорсткий динамометр з напівпровідниковими датчиками. У цьому випадку шляхом одночасної реєстрації зусиль та переміщень у процесі повторно-змінного навантаження зразка можна одержати експериментальну петлю гістерезису, площа якої характеризує розсіювання енергії в дослідженому матеріалі.

Колівальна система установки складається із закріпленого у верхньому затискувачі 2 зразка 1, на другому кінці якого навішений інерційний вантаж 10 з

немагнітного матеріалу у вигляді двосекційного порожнистого циліндра. В кожній секції вантажу знаходяться постійні магніти, які розташовані таким чином, що витки соленоїдів взаємодіють із зазначеними магнітами. Обмотка нижнього соленоїда 7 через синхронізатор 13 підключена до генератора змінної напруги ГЗ-18. Коливання зразка з вантажем збуджуються кожен раз, коли змінне магнітне поле соленоїда взаємодіє з полем постійного магніту. Коливальну систему приводять в резонанс шляхом зміни частоти генератора синусоїдальних коливань ГЗ-18.

Коливання зразка реєструють верхнім соленоїдом, сигнал з якого через логарифмуючий підсилювач надходить на осцилограф С1-19Б. На його екрані з підвищеним післясвіченням при одночасному включенні розгортки та виключенні генератора ГЗ-18 фіксується віброграма згасаючих коливань. Як вимірювач частоти або періоду коливань системи використовують електронний частотомір ЧЗ-33.

Підсилювач виконує функцію логарифмічного перетворювача сигналу. Введення в ланцюг навантаження діодів, опір яких зменшується при збільшенні амплітуди електричного сигналу за експоненціальним законом, дозволяє одержати на екрані осцилографа напівлогарифмовану віброграму згасаючих коливань.

При допущенні в'язкого тертя відношення двох послідовних значень амплітуд при згасанні можна представити у вигляді (рис. 3.11а):

$$\frac{a_k}{a_{k+1}} = \frac{a_0 e^{-kn\tilde{T}}}{a_0 e^{-(k+1)n\tilde{T}}} \cdot 100\% , \quad (3.24)$$

де n – показник згасання; \tilde{T} – період згасаючих коливань.

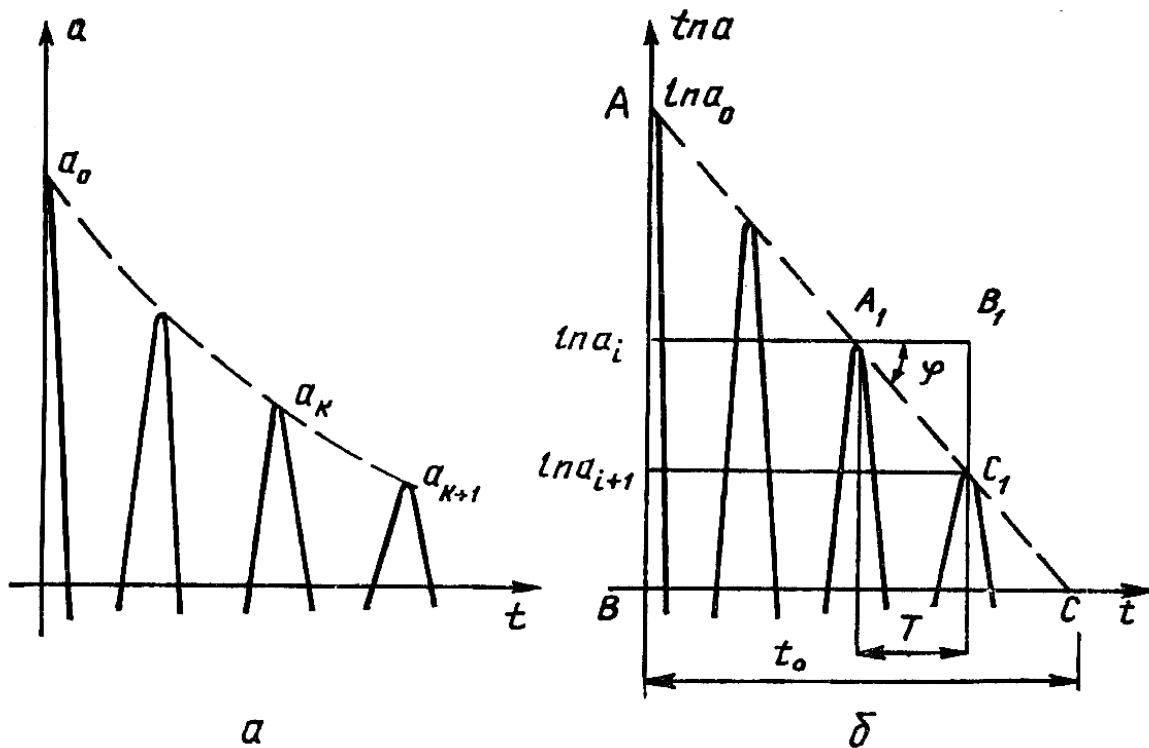


Рис. 3.11. Вихідна віброграма згасаючих коливань (а) та після електронного логарифмування (б)

Логарифмічний декремент коливань:

$$\delta = \ln \frac{a_k}{a_{k+1}} = n\tilde{T}. \quad (3.24)$$

Таким чином, для експериментального визначення δ необхідно виміряти показник n та період згасання T .

Якщо зменшення амплітуди коливань зразка відповідає експоненціальному закону, то залежність логарифму амплітуди від часу, що реєструється на екрані осцилографа, буде мати вигляд похилої прямої лінії (рис. 3.11б), рівняння якої має вигляд:

$$\lg a = \lg a_0 - n\tilde{T}. \quad (3.25)$$

Оскільки показник згасання n чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу прямої до осі часу, з подібності трикутників ABC та $A_1B_1C_1$ знаходимо:

$$\delta = \tilde{T} \operatorname{tg} \varphi = a_0 \frac{\tilde{T}}{t_0}, \quad (3.26)$$

де t_0 – точка перетину прямої з віссю часу.

Необхідні для розрахунку декременту величини a_0 та t_0 визначаються безпосередньо з екрана осцилографа. Період коливань \tilde{T} вимірюють частотоміром ЧЗ-33.

При використанні електронного логарифмування віброграм не враховується амплітудна залежність розсіювання енергії, але цей метод можна застосовувати лише для наближеної оцінки характеристик демпфірування.

Для точного визначення демпферних властивостей ПМ, а також встановлення амплітудної залежності декременту коливань віброграми реєструють за допомогою фотокамери. При цьому підсилювач переключають у режим лінійного підсилення електричного сигналу. Далі проводять обробку віброграм згасаючих коливань. Декремент коливань визначали за формулою:

$$\delta(\varepsilon_0) = -\frac{1}{\varepsilon_0} \frac{d\varepsilon_0}{dN_c}. \quad (3.27)$$

де ε_0 – амплітуда відносної деформації зразка при згасаючих коливаннях; $d\varepsilon_0/dN_c$ – похідна від амплітуди відносної деформації по кількості циклів, яка визначається графічним методом.

Установка дозволяє безпосередньо на екрані осцилографа С1-19Б реєструвати резонансну криву зразка, що випробовується. Конденсатор змінної ємкості генератора ГЗ-18 кінематично пов'язаний з потенціометром, що керує горизонтальною розгорткою осцилографа С1-19Б. Синхронна зміна частоти генератора ГЗ-18 та переміщення променя осцилографа С1-19Б по горизонталі здійснюють синхронним обертанням конденсатора та потенціометра за допомогою редукторного двигуна РД-09. Напрямок обертання двигуна змінюють реверсивним пристроєм.

Система вимірювання та забезпечення температури у діапазоні $-60 \dots +80^\circ\text{C}$ в робочому об'ємі камери складається з регулятора температури, термометра, нагрівального елемента, посудини Дьюара та випарника рідкого азоту.

Зміна робочої довжини зразка та застосування різних додаткових мас дозволяє проводити випробування при різних резонансних частотах коливань (20 ... 70 Гц) та амплітудах напружень (до 10 МПа).

Динамічний модуль пружності при поздовжніх резонансних коливаннях визначають за формулою:

$$E_D = \frac{4\pi^2}{g} \cdot \frac{f_p^2 P l}{F_L}, \quad (3.28)$$

де f_p – резонансна частота поздовжніх коливаннях; P – вага вантажу; l – довжина робочої частини зразка; F_L – площа поперечного перерізу зразка.

Вищенаведені співвідношення справедливі, якщо:

- система закріплення зразка та положення вантажу з магнітом у полі соленоїдів забезпечують стійкі поздовжні коливання;
- індукована в соленоїді електродвигуна сила прямо пропорційна амплітуді механічних коливань зразка;
- амплітуда корисного сигналу на вході підсилювача не менш, ніж удесятеро перевищує амплітуду завад.

3.4.5. Стенд для дослідження вібраційної міцності деталей та виробів

Технічні умови експлуатації багатьох об'єктів різного призначення передбачають вплив значних динамічних навантажень, що передаються на окремі деталі цих об'єктів. У зв'язку з цим є важливим дослідження стійкості деталей та виробів до динамічних навантажень у широкому частотному діапазоні та вивчення особливості коливань об'єктів у резонансних областях.

При роботі у вібраційних режимах можливе виникнення неприпустимо великих напружень та деформацій у конструктивних елементах, що може призвести до їх руйнування.

Коли частоти вимушених коливань збігаються з власними частотами об'єктів, тобто при резонансі, імовірність руйнування суттєво зростає. У зв'язку з цим разом з оцінкою міцності в умовах вібраційних впливів важливо встановити діапазони зміни власних частот в залежності від геометричних та інших параметрів об'єктів, а також від температури та інших кліматичних умов.

Експерименти, пов'язані з вивченням динамічної стабільності виробів, що працюють в умовах вібраційних впливів, та визначення резонансних частот, проводять на спеціальній установці, створеній на основі електродинамічного стенда ВЭДС-100Б (рис. 3.12).

Коливальна система установки складається з вібратора, на робочому столі якого закріплений об'єкт, що випробовується. Збудження коливань робочого стола здійснюється за допомогою генератора синусоїдальних коливань, блока автоматичного підтримування параметрів вібрації, підсилювача потужності та блока живлення котушок підмагнічування. Частота коливань контролюється цифровим частотоміром ЧЗ-33, який підключено до генератора.

Постійну амплітуду переміщення w або ефективне значення прискорення a_{ef} робочого стола при зміні частоти коливань задають блоком підтримки параметрів вібрації спільно з п'єзокерамічним датчиком. Інший п'єзокерамічний датчик підключений до блока вимірювання параметрів вібрації.

Значення резонансної частоти, що відповідає максимальній амплітуді переміщення об'єкта, визначають двома методами:

- 1) за цим методом електродинамічний мікрофон, використаний як датчик електричного сигналу, закріплюють над поверхнею об'єкта перпендикулярно до напрямку вектора переміщення, та підключають до осцилографа с1-19б;

2) за цим методом використовують індукційний датчик, який складається з котушки–датчика, котушки–приймальника, сердечника з електромагнітної сталі, блока живлення б5-8.

Попередні експерименти, що склалися з вимірювання переміщень різних точок об'єкта при коливаннях, показали, що вплив котушки–датчика як зосередженої маси, дуже малий (вага котушки не перевищує 10^{-2} Н) і ним можна нехтувати.

Температуру об'єкта в процесі проведення експериментів контролюють мідь-константовими термопарами, один зі спаїв яких закріплений на поверхні або у середині об'єкта, а інший знаходиться у термостаті при температурі 0°C (температура льоду, що тоне). Напруження між спаями термопари вимірювали цифровим мілівольтметром В7-21 з використанням комутатора термопар.

Питання для самоперевірки знань за розділом 3

- 1. Які ви знаєте динамічні характеристики матеріалів?*
- 2. У чому ви бачите переваги динамічних способів дослідження у порівнянні із статичними методами?*
- 3. Що таке «резонансна крива»?*
- 4. Чим відрізняються резонансні криві пластмас від резонансних кривих металів?*
- 5. Які вимоги до випробувальної апаратури при динамічних випробуваннях пластмас?*
- 6. Опишіть метод коливань консольно закріпленого зразка.*
- 7. Опишіть метод крутильних коливань.*
- 8. Опишіть метод поздовжніх коливань.*
- 9. У чому основна перевага методу резонансних коливань консольно закріплених зразків у порівнянні із методом поздовжніх коливань?*
- 10. Як визначається динамічний модуль пружності методом поперечних коливань консольного зразка?*
- 11. Як визначається динамічна в'язкість?*
- 12. Як розраховується тангенс кута механічних втрат?*
- 13. Що називається декрементом коливань?*
- 14. Як визначається динамічний модуль пружності методом поздовжніх коливань зразка з додатковою масою?*
- 15. Як проводиться оцінка вібраційної міцності елементів конструкцій?*

4. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Більшість конструкційних матеріалів працюють в певних температурних діапазонах. Зміна температур значною мірою впливає на такі важливі механічні характеристики як міцність, повзучість, релаксація напружень, довговічність та інші показники.

Для проведення розрахунків, пов'язаних з аналізом напружено-деформованого стану (НДС) виробів з полімерних матеріалів (пластмас, гум, композиційних матеріалів на основі полімерів) необхідно мати величини термомеханічних параметрів, зокрема, коефіцієнти лінійного теплового розширення (КЛТР) та величину усадки при різних температурах.

В полімерних матеріалах при підвищенні температури поряд з процесом теплового розширення відбувається термічна усадка матеріалу, тобто зменшення лінійних розмірів матеріалу в процесі нагріву. Термічна усадка – серйозний недолік пластмас у зв'язку з необхідністю забезпечувати достатньо високу точність розмірів деяких виробів (прилади точної механіки, деталі інформаційної техніки тощо). У зв'язку з цим виникає необхідність дослідження закономірностей процесів усадки, що виникає в полімерах в робочих температурних та часових діапазонах, а також оцінювати ступінь усадки в залежності від різних фізико-механічних характеристик конструкційних пластмас.

При підвищенні температури полімерний матеріал переходить у вискоеластичний стан, який характеризується низьким модулем пружності. У цьому стані матеріал не може застосовуватися як конструкційний. Визначення температури розм'якшення – це умова забезпечення надійної роботи матеріалу в безпечному температурному діапазоні.

Зниження температури експлуатації виробів з полімерних матеріалів може привести до їх крихкості – руйнуванню при малих пружних деформаціях, втра-

ти еластичності. Температура крихкості – це характеристика матеріалу, що обмежує температурний діапазон експлуатації та визначається виключно експериментальним шляхом.

В даному розділі розглядаються методи досліджень, що дозволяють вивчати вплив температури на характеристики міцності та пружності, визначати КЛТР, вимірювати величини термічної усадки, а також вимірювати температури розм'якшення та крихкості полімерних матеріалів.

4.1. Засоби для випробувань в умовах підвищених та знижених температур

4.1.1. Камера для випробувань при підвищених температурах

В процесі експлуатації вироби з конструкційних ПМ можуть піддаватися певним силовим впливам в широкому температурному діапазоні. Для випробувань цих матеріалів з врахуванням температури створена спеціальні камери (рис. 4.1 - 4.3) з термостійких та низько теплопровідних матеріалів. Вони дозволяють проводити випробування на розтяг, стиск та згин в діапазоні температур від -60 до $+100^{\circ}\text{C}$. Нагрівальна та холодильна камери закріплюються на рухомій траверсі універсальної випробувальної машини.

Випробувальний зразок (1) закріплюють у верхньому нерухомому (2) та нижньому рухомому (3) затискувачах. Конструкції затискувачів детально описані в пункті 1.1.3.

Нагрівання повітря у камері здійснюється ніхромовою спіраллю нагрівача 4 шляхом подачі змінного напруження з джерела 5.

Необхідний рівень напруження підтримується автоматичною системою із застосуванням контактного термометру 6. При досягненні необхідної температури контакти термометра 6 замикаються та відбувається зниження напруження на джерелі 5. При цьому відбувається повільне зниження температури аж до

розмикання контактів та процес повторюється. Таким чином температура повільно змінюється на малу величину навколо номінальної температури в камері.

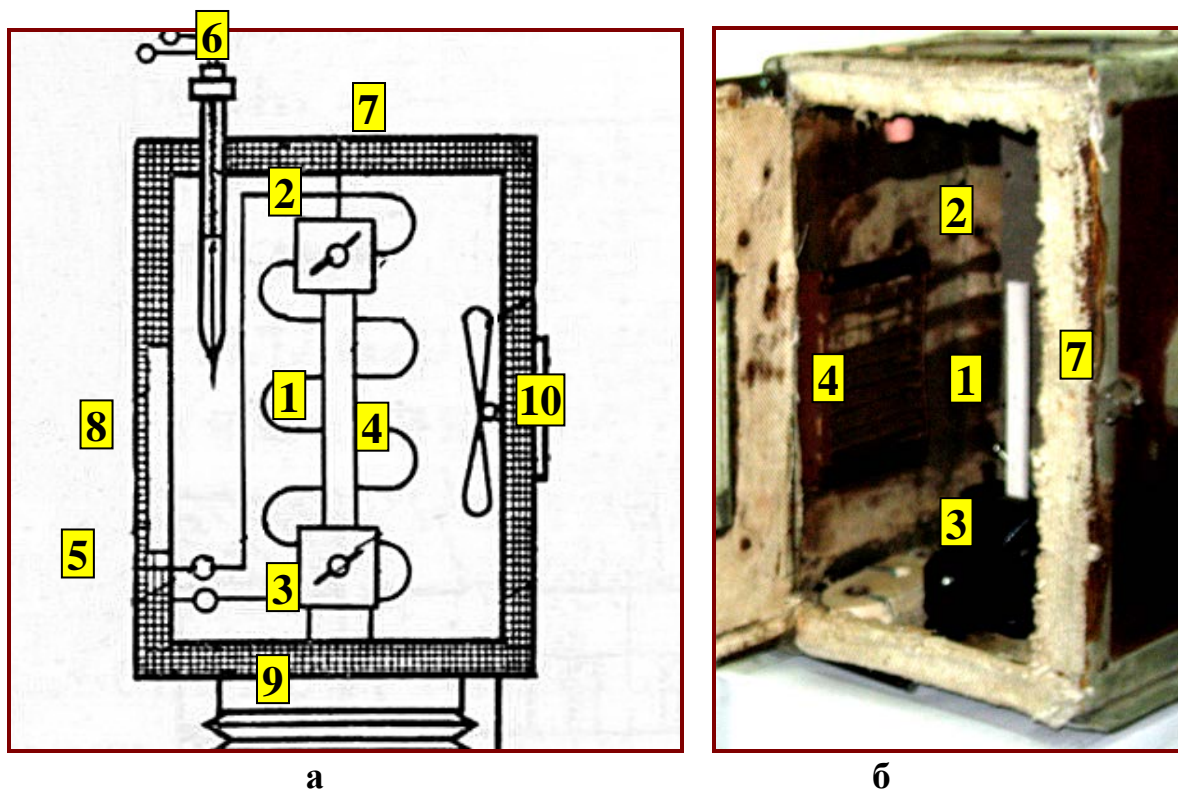


Рис. 4.1. Температурна камера для випробувань пластмас та гум при підвищених температурах: а - схема камера; б - термокамера, що закріплюється на універсальній випробувальній машині TIRA-test 2151; 1 - зразок; 2 - верхній нерухомий затискувач; 3 - нижній рухомий затискувач; 4 - спіраль нагрівача; 5 - джерело електричного напруження; 6 - контактний термометр; 7 - корпус температурної камери; 8 - оглядове вікно; 9 - система кріплення; 10 - вентилятор

Затискувачі зі зразком та системою нагріву та контактним термометром знаходяться в корпусі 7, який зафіксований на випробувальній машині системою закріплення 8.

Оглядове вікно 9 призначене для спостереження за станом зразка при випробуваннях. Вентилятор 10 переміщує повітря в термокамері та запобігає виникненню градієнту температури по об'єму.

Попередніми експериментами з використанням мідь-константанових термопар встановлено, що в діапазоні від 23 до 100°C відхилення температури від

номінального значення не перевищує $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Градієнт температур в різних точках термокамери також не перевищує 1°C .

Після закріплення зразка у затискачах та встановлення заданого рівня температури необхідно витримати камеру зі зразком протягом 20-30 хв. для повного прогріву затискачів та самого зразка.

Недолік системи полягає в тому, що неможливо випробувати стандартні зразки до їх повного розриву, якщо максимальне відносне видовження матеріалу перевищує 200%. Це пов'язано з обмеженням розмірів камери за висотою. У цих випадках можна використовувати зразки зі зменшеною довжиною.

4.1.2. Камера для випробувань при знижених температурах

Внутрішня будова камери (рис. 4.2) принципово не відрізняється від описаної вище.

Система регулювання і контролю температури складається з вентилятора 8, піддону для сухого льоду 4, цифрового термометра та блока живлення постійної напруги з можливістю зміни її величини.

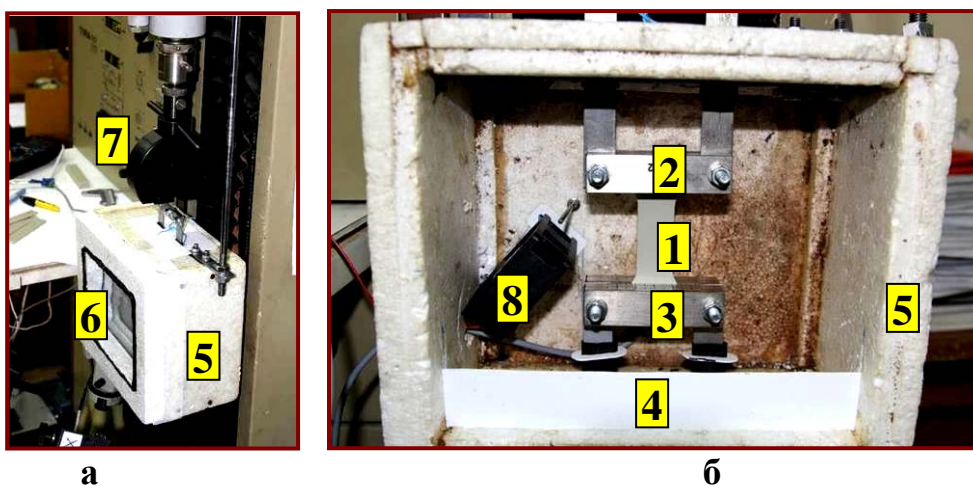


Рис. 4.2 – Холодильна камера для випробувань пластмас та гум при знижених температурах: а - камера, закріплена на універсальній випробувальній машині TIRA-test 2151, б - внутрішній вигляд термокамери; 1 - зразок; 2 - верхній нерухомий затискувач; 3 - нижній рухомий затискувач; 4 - піддон для сухого льоду; 5 - корпус температурної камери; 6 - кришка з оглядовим вікном; 7 - система кріплення; 8 - вентилятор

Вентилятор типу PMD (рис. 4.3а) виконує функцію не тільки для циркуляції повітря всередині установки та усунення градієнту температури, але він також слугує для випаровування холодоагенту. Збільшення швидкості потоку повітря, що утворює вентилятор, підвищує інтенсивність випаровування холодоагенту та знижує температуру у камері. Вентилятор надійно функціонує в повному діапазоні робочих температур камери від кімнатної до -60°C .



а



б



в

Рис. 4.3. Засоби створення зниженої температури в холодильній камері: а - вентилятор постійної напруги; б - джерело живлення постійної напруги Б5-45; в - гранули сухого льоду

Для плавного регулювання швидкості обертання вентилятора застосований блок живлення Б5-45 (рис. 4.3б) з дискретним регулюванням напруги від 0 до 50 В. Крок зміни напруги дорівнює 0,1 В.

Як холодоагент використовується твердий діоксид вуглецю CO_2 (сухий лід, рис. 4.3в). Це тверда не токсична, вибухобезпечна речовина, яка випаровується при температурі $-78,5^{\circ}\text{C}$. Для вимірювання температури усередині холодильної камери застосований цифровий термометр з діапазоном температури

вимірювання від -200°C до $+500^{\circ}\text{C}$. Стандартна похибка по всій шкалі термометра не перевищує $0,2^{\circ}\text{C}$.

Корпус холодильної камери виготовлений з пінопласту високої густини з товщиною стінок 30 мм. Для можливості спостерігати процеси в середині камери та вести фото і відео реєстрацію процесів деформування та руйнування зразків слугує передня кришка камери з двошаровим оглядовим вікном.

Обидві камери закріплені за допомогою різьбових отворів універсальної випробувальної машини через систему кріплення (рис. 4.4), яка дозволяє регулювати положення камери по горизонталі і вертикалі.

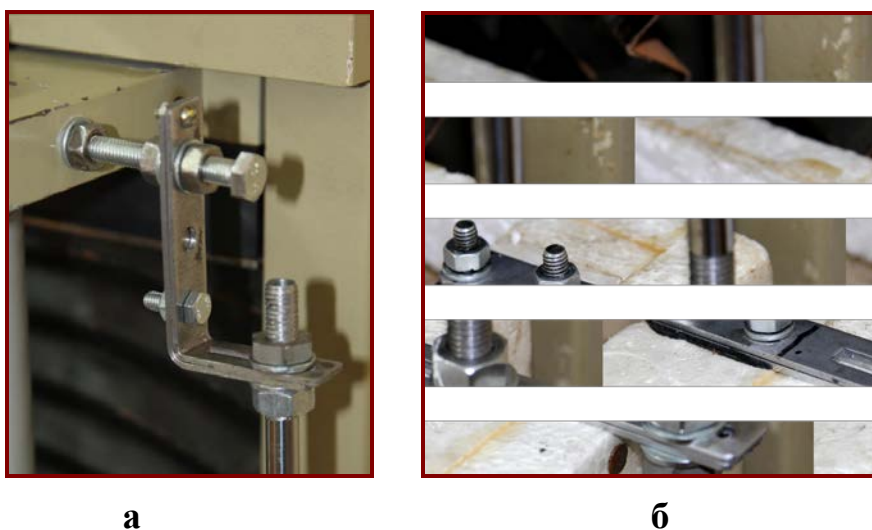


Рис. 4.4. Системи кріплення та регулювання положення термокамери (а) та холодильної камери (б)

4.1.3. Випробувальна установка для вимірювання температурних деформацій полімерних матеріалів

Випробувальна установка, схема якої наведена на рис. 4.5, складається з п'яти горизонтально розташованих однакових секцій (на схемі показана лише одна), що надає можливості одночасно випробувувати 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.

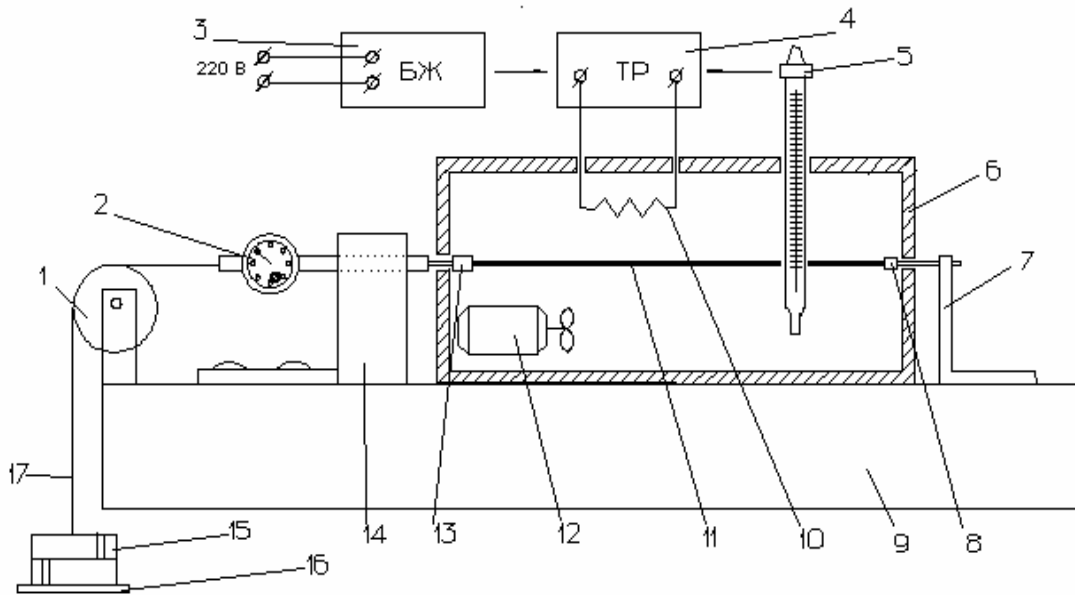


Рис. 4.5. Схема випробувальної установки для вимірювання температурних деформацій плівкових та листових полімерних матеріалів: 1 - шків з опорою; 2 - індикатор годинникового типу; 3 - блок живлення; 4 - терморегулятор; 5 - контактний термометр; 6 - корпус термокамери; 7 - кріплення для нерухомого затискувача; 8 - нерухомий затискувач; 9 - основа; 10 - спіраль нагрівача; 11 - зразок; 12 - вентилятор; 13 - рухомий затискувач; 14 - кріплення індикатора годинникового типу; 15 - вантажі; 16 - піддон для вантажів; 17 - гнучка тяга.

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 $\pm 0,005$ мм.

Конструкція затискувачів дозволяє надійно закріплювати тонкі зразки товщиною від 0.02 мм, а також регулювати силу притискання. 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).

4.2. Прилади для вимірювання температурних деформацій

4.2.1. Інструментальні засоби вимірювання розмірів і деформацій зразків

Загальну деформацію зразків виміряють індикаторами годинникового типу ИЧ-10 та МИГ-1 (рис. 4.6а та 4.6б), штангенциркулями з цифровою індикацією (рис. 4.6в), оптичною системою катетометра В-630 (рис. 4.6г) та відліковими мікроскопами типу МПБ-2 (рис. 4.6д).

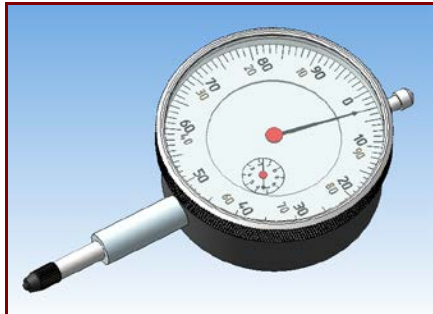
Точність вимірювань складає:

- $\pm 0,001$ мм для індикаторів годинникового типу МИГ-1;
- $\pm 0,01$ мм для індикаторів годинникового типу ИЧ-10, катетометра В-630 та штангенциркуля з цифровою індикацією;
- $\pm 0,05$ мм для мікроскопа МПБ-2.

Вимірювання механічними засобами. Індикатори годинникового типу закріплювалися на робочому столі випробувальної машини (рис. 4.6 а, б) таким чином, щоб ніжка індикатора контактувала з поверхнею зразка. При деформуванні об'єкту ніжка індикатора переміщується разом з точкою об'єкту і за шкалою індикатора проводиться відлік переміщення у міліметрах.

Вимірювання загальних деформацій зразка проводимо за допомогою штангенциркуля з цифровою індикацією (рис. 4.6 в).

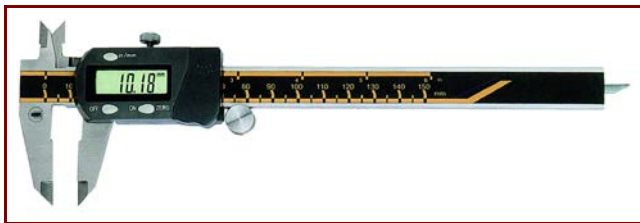
Вимірювання оптичними засобами. Оскільки робоче положення катетометра В-630 – вертикальне, його застосовували виключно для вимірювання вертикальних переміщень препаратів при навантаженні.



а



б



в



г



д

Рис. 4.6. Обладнання для вимірювання деформацій: а – індикатор годинникового типу ИЧ-10; б - індикатор годинникового типу МИГ-1; в - штангенциркуль з цифровою індикацією; г - катетометр В-630; д - відліковий мікроскоп МПБ-2

Для вимірювання горизонтальних переміщень використовували відліковий мікроскоп МПБ-2. Цей прилад можна встановлювати за допомогою штатива у будь-яке положення, у тому числі таким чином, щоб вимірювати переміщення точок об'єкту у горизонтальному напрямі.

Вимірювання проводяться шляхом безпосереднього відліку показань оптичних приладів за вмонтованими шкалами. У катетометрі **В-630** застосована двомірна шкала Ноніуса, що підвищує точність вимірювання до 0,01 мм.

4.2.2. Оптичний катетометр В-630

Катетометр В-630 (рис. 4.7) призначений для безконтактного вимірювання вертикальних координат виробів, розташованих у місцях, важкодоступних для безпосереднього вимірювання. Катетометр В-630 може експлуатуватися при температурі $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, відносній вологості повітря $(65 \pm 5)\%$ та за атмосферного тиску 630 ... 800 мм рт. ст.

Технічні характеристики катетометра В-630. Межа виміру по вертикалі – від 0 до 630 мм.

Інтервали відстаней від захисного скла до об'єкта при використанні лінзових насадок – від 280 до 480 мм (перша насадка); від 420 до 810 мм (друга насадка) та від 700 до 1810 мм (третья насадка);

Межа мікрометричної подачі каретки по вертикалі не менше 5 мм,

Межа повороту колонки навколо осі від 0° до 360° ;

Межа основної похибки приладу, мкм, не більше $\pm(10+L/100)$, де L - інтервал відстаней від переднього торця об'єктива труби до об'єкта вимірювання в мм;

Напруга живлення катетометра – 220 В $\pm 10\%$, 50 Гц $\pm 2\%$;

Габаритні розміри приладу – не більше 460 x 460 x 1400 мм;

Маса приладу – не більше 72 кг.

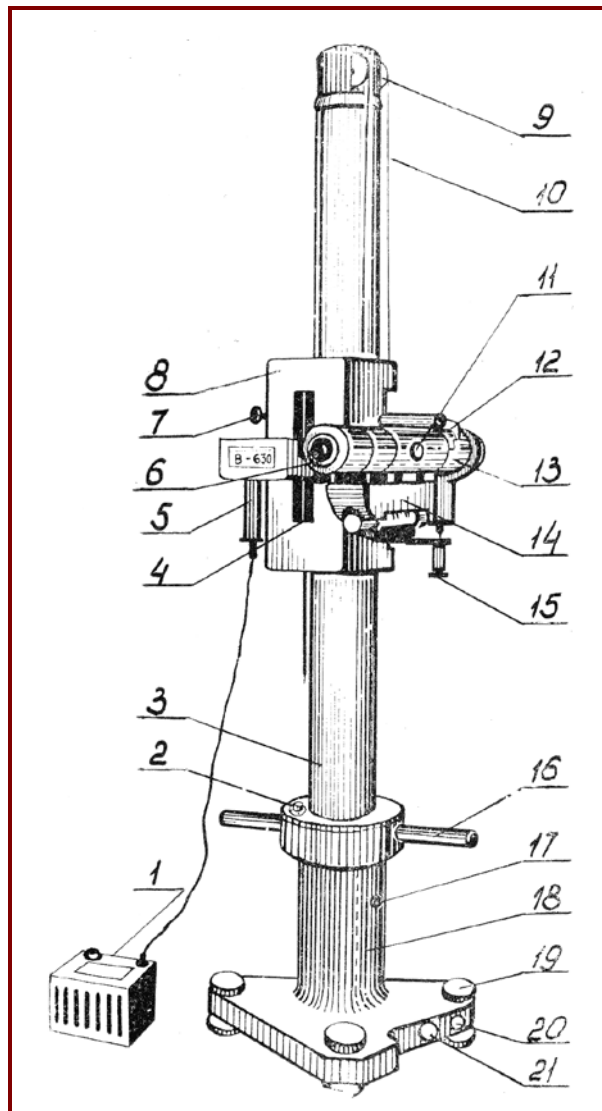


Рис. 4.7. Катетометр В-630: 1 - трансформатор, 2 - рівень, 3 - колонка, 4 - гвинт мікрометричний, 5 - освітлювач, 6 - окуляр, 7 - гвинт, 8 - каретка, 9 - ролик, 10 - трос, 11 - маховичок, 12 - лінза насадочное, 13 - труба візирна, 14 - рівень, 15 - гвинт мікрометричний, 16 - рукоятка, 17 - гвинт, 18 - підстава, 19 - регульована опора, 20, 21 - гвинти

Порядок роботи з катетометром В-630. Робота з приладом проводиться у такий послідовності:

1. Відкрити гвинт і перемістити вимірювальну каретку на рівень обраної точки об'єкта.

2. Встановити окуляр візирної труби на різкість зображень масштабної сітки, шкали і бульбашки рівня. Спостерігаючи в окуляр, вирівняти зображення

кінців бульбашки рівня гвинтом. При точній наводці необхідно стежити за тим, щоб кінці бульбашки рівня утворили дугу.

3. Навести на різкість зображення вимірюваного об'єкта, користуючись маховичком. Потім за допомогою мікрометричного гвинта, при закріпленому гвинті, провести точне наведення візирної труби на обрану точку об'єкта.

4 Сітка візирної труби має перехрестя, лівий горизонтальний штрих якого виконаний у вигляді кутового бісектору. При наведенні візирної труби, вибрана точка об'єкта має розташовуватися точно посередині кутового бісектору на рівні горизонтального штриха.

У полі зору окуляра одночасно видні зображення двох штрихів міліметрової шкали, позначених великими цифрами, і масштабна сітка.

Зняти перший відлік по шкалі і масштабній сітці. Індексом для відліку цілих міліметрів служить нульовий бісектор десятих часток міліметра. Відлік десятих часток міліметра позначений цифрою останнього пройденого бісектора десятих часток міліметра. Відлік сотих і тисячних часток міліметра проводиться в горизонтальному напрямку сітки там, де міліметровий штрих шкали розташований точно посередині бісектора.

5. Перемістивши каретку по колонці, навести візирну трубу на другу точку вимірюваного об'єкта і, перевіривши установку труби по циліндричному рівню зняти другий відлік. Різниця між двома вимірами дасть величину вимірюваного відрізка. Для підвищення точності вимірювання виміри повторити кілька разів і визначити їх середнє значення.

Зміна фокусування об'єкту та азимутальний поворот колонки в процесі вимірювання не допускається, оскільки це вносить похибку у вимірювання.

4.2.3. Мікроскоп відліковий типу МПБ-2

Мікроскоп МПБ-2 (рис. 4.8) призначений для вимірювання розмірів зразків та їх зміни під впливом температури (усадка).

Технічні характеристики мікроскопа МПБ-2. Ціна поділки шкали 0,05 мм; поле бачення не менше 8,5 мм; збільшення мікроскопа не менше 24 крат $\pm 5\%$; межа допустимої основної похибки $\pm 0,01$ мм; габаритні розміри: висота (в крайньому верхньому положенні) не більше 202 мм; діаметр не більше 50 мм; маса не більше 0,480 кг.

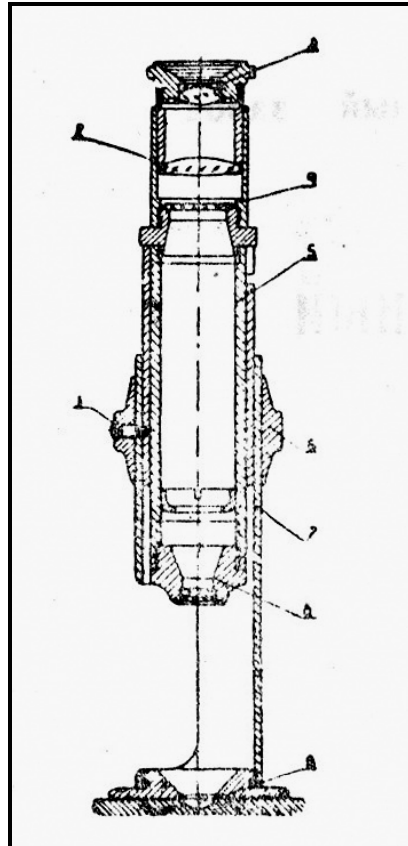


Рис. 4.8. Мікроскоп МПБ-2: 1 - гвинт; 2 - окуляр; 3 – окулярне кільце; 4 - сітка; 5 - тубус; 6 - установче кільце; 7 - колонка; 8 - об'єктив; 9 - вимірюваний об'єкт

Принципи роботи мікроскопа МПБ-2. Мікроскоп складається з колонки, установочного кільця і тубуса в якому закріплені об'єктив і окуляр з сіткою. Принцип роботи мікроскопа заснований на порівнянні зображення зразка до і після температурних впливів зі шкалою сітки.

Порядок роботи мікроскопа МПБ-2. Для вимірювання мікроскоп встановлюють підставкою на випробовуваний зразок так, щоб отвори біля основи

було по можливості концентричними з вимірюваним зразком, а вікно в колонці знаходилося проти зовнішнього джерела світла.

Спостерігаючи в окуляр і обертаючи окулярне кільце 3, встановити різке зображення шкали сітки. Якщо при цьому зображення зразка не буде різким, то обертанням установчого кільця 6 домагаються отримання різкого зображення зразка в полі зору окуляра.

4.3. Метод визначення коефіцієнта лінійного теплового розширення

Метод, згідно з ГОСТ 15173-70 [50] поширюється на пластмаси і дозволяє визначати їх середні коефіцієнти лінійного теплового розширення.

Метод передбачає визначення лінійного теплового розширення, не пов'язаного зі зміною розмірів при нагріві внаслідок зміни вмісту вологи, затвердіння, втрати пластифікатора або розчинника, зняття внутрішніх напружень і інших чинників, і тому є наближеним.

Суть методу полягає у випробуванні зразка пластмаси, за якого визначають:

а) середній коефіцієнт лінійного теплового розширення в мінімальному інтервалі температур α_T ;

б) середній коефіцієнт лінійного теплового розширення у встановленому інтервалі температур $\alpha^{T_1 T_2}$ (T_1 і T_2 - межі встановленого інтервалу температур).

Середній коефіцієнт лінійного теплового розширення характеризує відносний приріст довжини зразка, викликаний підвищенням його температури від нижньої до верхньої межі інтервалу, віднесений до величини цього інтервалу.

У тих інтервалах температур, де коефіцієнт лінійного теплового розширення змінюється з температурою, величини α_T і $\alpha^{T_1 T_2}$, як правило, не збігаються, причому α_T може бути як більше, так і менше від $\alpha^{T_1 T_2}$. Тому заміна одного коефіцієнта іншим не допускається.

Визначення середнього коефіцієнта лінійного теплового розширення $\alpha_{T_1}^{T_2}$ не проводять:

– в інтервалі температур $T_2 - T_1 < 10^\circ\text{C}$ для матеріалів, що мають $\alpha_{T_1}^{T_2} < 30 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$;

– в інтервалі температур $T_2 - T_1 < 60^\circ\text{C}$ для матеріалів, що мають $\alpha_{T_1}^{T_2} < 5 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$.

Похибки, що допускаються при вимірюваннях, зазначені в табл. 4.1.

Вимір видовження проводять з похибкою не більше 10^{-6} м для будь-яких значень коефіцієнта лінійного теплового розширення. Якщо в процесі нагріву використовують теплоносій, то він не повинен впливати на результати вимірювань.

Таблиця 4.1. Допустимі похибки при вимірюванні коефіцієнтів лінійного теплового розширення

Відносна погрішність визначення в інтервалі температур 10°C	$\alpha_{T_2}^{T_1}, \text{C}^{-1}$					
	$\geq 30 \cdot 10^{-6}$		$\geq 70 \cdot 10^{-6}$		$\geq 170 \cdot 10^{-6}$	
	Погрішність вимірювання температури та видовження зразка					
	$^\circ\text{C}$	мкм	$^\circ\text{C}$	мкм	$^\circ\text{C}$	мкм
10	$\pm 0,2$	± 1	$\pm 0,2$	± 2	$\pm 0,2$	± 5
20	$\pm 0,5$		$\pm 0,5$		$\pm 0,5$	

Мінімальний інтервал температур 10°C ; розширення його роблять на величини, кратні 10°C . Вибір інтервалу температур і вимоги до точності виміру температури та видовження при визначенні коефіцієнта лінійного теплового розширення передбачаються в стандартах і технічних умовах на конкретні пластмаси.

Середній коефіцієнт лінійного теплового розширення в мінімальному інтервалі температур α_T визначають в інтервалі температур, рівному 10°C , і відносять до середньої температури цього інтервалу.

Середній коефіцієнт лінійного теплового розширення α_{T1}^{T2} визначають в інтервалі температур, кратному 10°C , і відносять до величини усього інтервалу.

Визначення середніх коефіцієнтів лінійного теплового розширення не проводять за температури, вищої за температуру розм'якшення пластмас, яку визначають одним зі стандартних методів.

Нижня межа встановленого інтервалу температур t_1 або нижнє значення середньої температури мінімального інтервалу передбачається в стандартах і технічних умовах на пластмаси.

У прийнятому інтервалі температур приріст довжини зразка залежно від температури має бути лінійним. При нелінійній залежності визначення проводять в діапазоні температур, в якому виконуються вимоги лінійності.

Апаратура та устаткування

Середній коефіцієнт лінійного теплового розширення визначають на приладі (рис. 4.9), що має :

а) термокамеру або інші пристрої, що забезпечують нагрівання зі швидкістю не більше $1,5^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. в стаціонарному або нестаціонарному режимах або термостатування в заданих інтервалах температур і підтримка однакової температури з погрішністю не більше $0,2^{\circ}\text{C}$ по усій довжині зразка;

б) пристрій, в який поміщають зразок, і стрижень, що передає його розширення на індикатор для виміру видовження; стрижень має бути виготовлений з матеріалу з найменшим коефіцієнтом лінійного теплового розширення (рекомендується використовувати плавлений кварц) та має забезпечувати компенсацію власного теплового розширення;

в) пристрій для вимірювання приросту довжини зразка при її збільшенні або зменшенні в процесі нагріву шляхом візуального відліку або за допомогою автоматичного запису; пристрій не повинен чинити на зразок тиски більші ніж 29 кПа ;

г) датчик температури, термометр або термопару з індивідуальним градуванням для вимірювання температури зразка з погрішністю не більше $0,1^{\circ}\text{C}$.

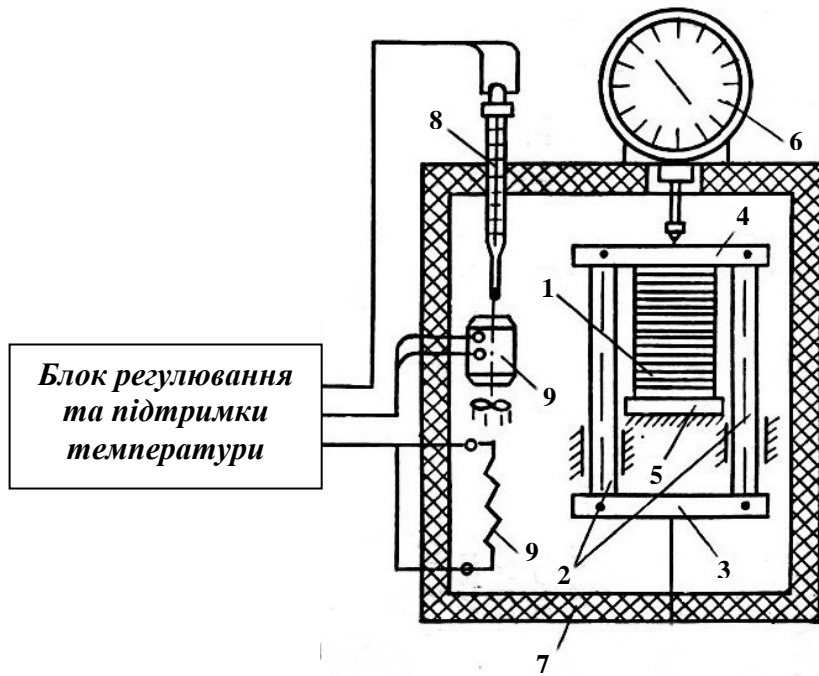


Рис. 4.9. Схема приладу для вимірювання коефіцієнта лінійного теплового розширення: 1 - зразок; 2, 3, 4, 5 - елементи для стабілізації положення зразка; 6 - вимірювач деформації зразка; 7 - термокамера; 8 - контактний термометр; 9 - нагрівач; 10 - вентилятор

При визначенні α_{T1}^{T2} в інтервалі температур, рівному або більшому 60°C з максимальною похибкою не більше 10%, температуру вимірюють з похибкою не більше $\pm 1^\circ\text{C}$, а видовження з похибкою:

- ± 1 мкм - при α_{T1}^{T2} , рівному або більше $(5 \cdot 10^{-6})^\circ\text{C}^{-1}$;
- ± 5 мкм - при α_{T1}^{T2} , рівному або більше $(30 \cdot 10^{-6})^\circ\text{C}^{-1}$;
- ± 10 мкм - при α_{T1}^{T2} , рівному або більше $(70 \cdot 10^{-6})^\circ\text{C}^{-1}$.

Вимоги до зразків.

Для випробування використовують зразки довжиною не менше 50 мм, круглого, діаметром $(10 \pm 0,5)$ мм, або квадратного поперечного перерізу із стороною $(7 \pm 0,5)$ мм. При виникненні розбіжностей для випробування застосовують зразки завдовжки 50 мм.

В середині бокової поверхні зразка, перпендикулярно до неї, висвердлюють отвір діаметром 1 мм до осьової лінії зразка. Воно призначене для подаль-

шого введення в зразок датчика температури або термопари при випробуванні в нестационарному режимі.

Довжину зразка вимірюють з похибкою не більше 0.01 мм при температурі $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ і відносній вологості $(50 \pm 5) \%$.

Кількість зразків для випробування від кожної партії матеріалу і для кожної осі анізотропії має бути не менше трьох. Спосіб і режим виготовлення зразків і їх термообробка передбачаються в стандартах або технічних умовах на пластмаси.

Проведення випробувань.

Перед випробуванням встановлюють температурні межі, в яких вимірюватиметься коефіцієнт лінійного теплового розширення згідно з вимогами стандартів, технічних умов на пластмаси.

Визначення коефіцієнта лінійного теплового розширення проводять в стаціонарному або нестационарному режимах.

При стаціонарному режимі проводять термостатування зразка при температурі виміру доти, поки не закінчиться видовження зразка. Температуру в термокамері доводять при стаціонарному режимі до температури T_1 .

При нестационарному режимі зразок нагрівають до температури на 10°C нижче нижньої температурної границі виміру.

Зразок встановлюють в термокамері і вводять в нього термопару або датчик температури, якщо випробування проводять в нестационарному режимі. У разі випробування тільки в стаціонарному режимі установка термопари в зразку необов'язкова.

При нестационарному режимі випробування після досягнення в зразку температури, не менш ніж на 10°C нижчої від нижньої температурної границі виміру, налаштовують вимірювач видовження на початок виміру і розпочинають нагрівання зі швидкістю, не більшою $1.5^\circ\text{C}/\text{хв}$.

При стаціонарному режимі випробування зразок термостатують при температурі T_1 , потім при температурі T_2 і знову при температурі T_1 .

За початок відліку приймають свідчення покажчика видовження при температурі, рівній нижній температурній границі. Вимірювання приросту довжини зразка проводять при температурах, що відповідають межах інтервалу.

Обробка результатів.

Середній коефіцієнт лінійного теплового розширення (α) в $^{\circ}\text{C}^{-1}$ обчислюють за формулою:

$$\alpha = (1/l_0) \cdot (\Delta l / \Delta T),$$

де: Δl - приріст довжини зразка у границях інтервалу температур, мм; $\Delta T = T_2 - T_1$ - приріст температури від t_1 до t_2 , $^{\circ}\text{C}$; T_1, T_2 - нижня і верхня границі інтервалу температур, $^{\circ}\text{C}$; l_0 - довжина зразка при $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, мм.

Обчислення α_T або $\alpha_{T_1}^{T_2}$ роблять окремо для кожного зразка і для кожної головної осі анізотропії.

За результат випробування для кожної партії матеріалу і кожної головної осі анізотропії приймають середнє арифметичне значень для окремих зразків, з округленням до $(1 \cdot 10^{-6})^{\circ}\text{C}^{-1}$.

4.4. Методи вимірювання теплової усадки пластмас

4.4.1. Метод вимірювання усадки термопластичних та термореактивних пластмас

Стандарт [53] встановлює метод визначення усадки термопластичних та термореактивних пластмас.

Вимоги до зразків

Для визначення усадки і додаткової усадки термопластів застосовують зразки, форма і розміри яких вказані в табл. 4.2.

При випробуванні термореактивних формувальних мас застосовують зразки типу 1 та 3. За погодженням допускається застосовувати зразки типу 6 та 7.

Таблиця 4.2. Форма та розміри зразків для випробувань

Тип зразка	Форма зразка	Розміри, мм		
		Довжина або діаметр	Ширина	Товщина
1	Брусок	120 ± 2	15 ± 0,5	10 ± 0,2
2	— // —	120 ± 2	10 ± 0,2	4 ± 0,2
3	— // —	80 ± 2	10 ± 0,2	4 ± 0,2
4	— // —	50 ± 1	6 ± 0,2	4 ± 0,2
5	Диск	50 ± 1	—	2 ± 0,2
6	— // —	100 ± 1	—	4 ± 0,2
7	— // —	100 ± 1	—	2,8 ± 0,2

Проведення випробувань

Випробування проводять не менше ніж на трьох зразках, отриманих послідовним формуванням в одному і тому ж гнізді прес-форми.

При визначенні усадки встановлюють розміри матриці прес-форми і зразків до і після термообробки.

Зразки вимірюють після витримки їх з моменту виготовлення не менше 16 год. і не більше 24 год. при (23±2)°С, включаючи час на кондиціонування.

Умови термообробки термореактивних формувальних мас повинні бути вказані в нормативно-технічній документації на матеріал. При відсутності цих вказівок температура термообробки повинна бути для сечовиноформальдегідних формувальних мас (80±3)°С, для всіх інших видів формувальних мас – (110±3)°С. Час термообробки – (168±2) год., за прискореного випробування – (48±1) год. Час термообробки має бути зазначеним в нормативно-технічній документації на конкретний матеріал.

Після закінчення термообробки зразки з термореактивних формувальних мас виймають з термостата, охолоджують до температури (23±2)°С і витримують при цій температурі і відносній вологості повітря (50±5)% не менше 3 год., після чого знову вимірюють зразки при цій же температурі з похибкою не більше 0,02 мм вищезазначеним способом.

Умови термообробки термoplastів встановлюють в залежності від температурних режимів експлуатації виробів з матеріалів, що випробуються.

Обробка результатів

Усадку (ε_y) в процентах обчислюють за формулою:

$$\varepsilon_y = [(L_0 - L_1) / L_0] \cdot 100\% ,$$

де L_0 - розмір прес-форми, мм; L_1 - розмір зразка, мм.

Додаткову усадку (ε_y^*) у відсотках обчислюють за формулою

$$\varepsilon_y^* = [(l_1 - l_2) / l_1] \cdot 100\% ,$$

де l_1 - розмір зразка перед термообробкою, мм; l_2 - розмір зразка після термообробки, мм.

Анізотропію усадки (a) або анізотропію додаткової усадки (a^*) обчислюють за формулами:

$$a = (\varepsilon_y)_b / (\varepsilon_y)_1 ; a^* = (\varepsilon_y^*)_b / (\varepsilon_y^*)_1 ,$$

де $(\varepsilon_y)_1$, $(\varepsilon_y^*)_1$ - величина усадки або додаткової усадки вздовж напрямку лиття, %; $(\varepsilon_y)_b$, $(\varepsilon_y^*)_b$ - величина усадки або додаткової усадки перпендикулярно напрямку лиття, %.

4.4.2. Методи вимірювання теплової усадки листових виробів з полівінілхлориду

Стандарт [39] поширюється на ПВХ матеріали підлог (рулонні і плиткові) і встановлює метод контролю зміни лінійних розмірів за довготривалих впливів температури.

І. Метод визначення зміни лінійних розмірів за рисками.

Суть методу полягає у вимірюванні відстані між рисками, нанесеними на зразок до і після впливу на нього заданої температури протягом заданого часу.

Вимоги до зразків.

Випробування проводять на трьох квадратних зразках з розміром сторони (150 ± 1) мм.

Апаратура та устаткування:

- електрична сушильна шафа, що забезпечує і підтримує температуру $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$;

- оптичний пристрій, забезпечений вимірювальною шкалою з ціною поділки не більше 0,1 мм.

- розмічальний пристрій (рис. 4.10), що складається з металевого стержня і двох голок, встановлених на відстані $(100 \pm 0,5)$ мм один від одного; радіус вістря голки має бути не більше 0,05 мм.

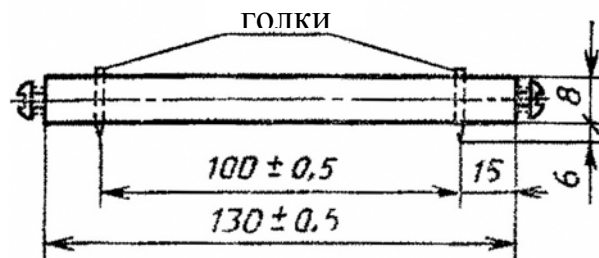


Рис. 4.10. Пристрій для розмітки зразків

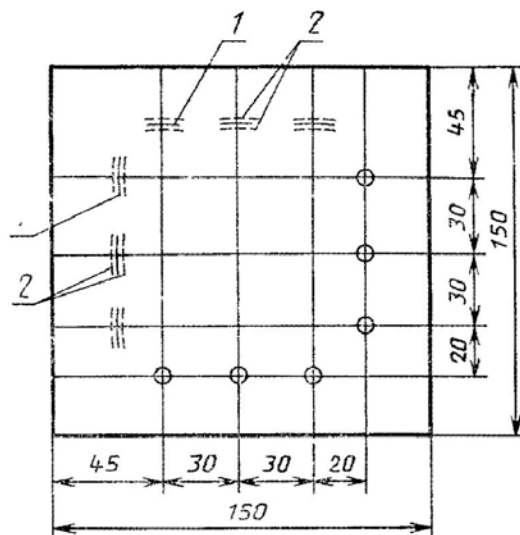


Рис. 4.11. Розмітка зразка для визначення усадки: 1 - риски до випробування, 2 - риски після випробування

Підготовка та проведення випробування.

Зразок кладуть на горизонтальну поверхню лицьовою стороною вгору і за допомогою пристрою для розмітки наносять по чотири лінії в поздовжньому і поперечному напрямках.

З крайніх точок перетину поздовжніх і поперечних ліній розмічальним шаблоном наносять лінії, як зазначено на рис. 2.9.

Розмічені зразки поміщають в сушильну шафу, нагріту до температури $(70\pm 2)^\circ\text{C}$, на 5 год. Після витримки при підвищеній температурі зразок кондиціонують 30 хв. при температурі $(23\pm 5)^\circ\text{C}$

Вищезазначеним способом розмічальним пристроєм знову наносять лінії.

Відстань між центрами двох ліній вимірюють за допомогою оптичного пристрою (мікроскопа МПБ-2 або катетометра В-630, що описані в розділі 2.2).

Обробка результатів

Деформацію усадки ε_y у відсотках обчислюють за формулою

$$\varepsilon_y = (\Delta l / l) \cdot 100\% ,$$

де Δl відстань між двома лініями, мм; l відстань між голками розмічального пристрою, мм.

II. Метод визначення зміни лінійних розмірів за допомогою пристосування для фіксації зразка

Суть методу полягає у визначенні зміни відстані між протилежними сторонами зразка в поздовжньому і поперечному напрямках після витримки при підвищеній температурі.

Вимоги до зразків

Для проведення випробувань з обраного матеріалу вирізають квадратні зразки з розмірами сторін (100 ± 1) мм, відступив від краю не менше ніж 20 мм.

Апаратура та устаткування: електрична сушильна шафа, що забезпечує і підтримує температуру $(70\pm 2)^\circ\text{C}$; приладдя для фіксації зразка з вимірювальним індикатором годинникового типу ИЧ-10 (див. розділ 2.2).

Схема пристосування для фіксації зразка типу ППР зображена на рис. 2.10.

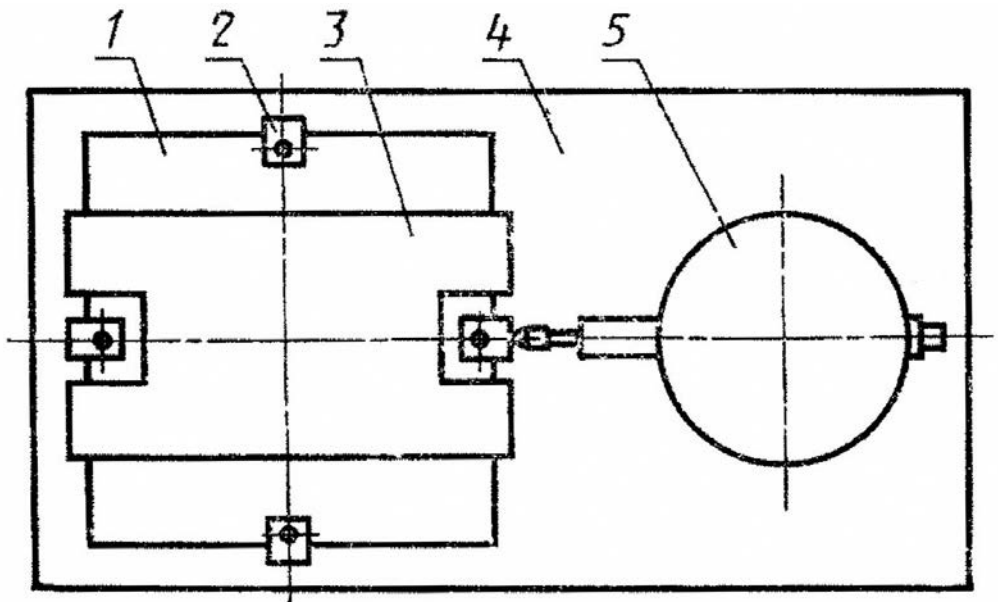


Рис. 4.12. 1 - зразок; 2 - затискувач; 3 - притискач; 4 - підставка; 5 - індикатор годинникового типу

Підготовка та проведення випробування.

На кожному зразку точками відзначають середину кожної зі сторін, а також поздовжній і поперечний напрями виготовлення зразка.

Зразок з затискувачами фіксують на основі пристрою таким чином, щоб поздовжній напрямок зразка збігалося з віссю вимірювального пристосування. Включають вимірювальний пристрій і записують показання індикатора.

Зразок з затискачами поміщають в електричну сушильну шафу, нагріту до температури $(70\pm 2)^\circ\text{C}$, і витримують протягом 5 год.

Після термообробки зразок з затискачами витримують протягом 30 хв. і знову обмірюють в поздовжньому і поперечному напрямках так само, як до термостатування.

Обробка результатів

Величину зміни лінійних розмірів ε_y у відсотках обчислюють за формулою

$$\varepsilon_y = [(L_1 - L_2) / L] \cdot 100\% ,$$

де L_1 - показання індикатора при обмірі зразка до термообробки, мм; L_2 - показання індикатора при обмірі зразка після термообробки, мм; L - розмір зразка, який дорівнює 100 мм.

4.4.3. Методи визначення зміни довжини труб, виготовлених з термопластів, після прогріву

За стандартом [62] визначають зміну довжини труб, виготовлених з непластифікованого полівінілхлориду, поліетилену і поліпропілену, після прогріву в рідкому і повітряному середовищах.

I. Метод визначення зміни довжини у рідкому середовищі

Метод полягає у вимірюванні відстані між мітками на поверхні зразка труби до і після його витримки в рідкому середовищі при заданих температурі і часу.

Вимоги до зразків.

Для труб діаметром не більше 180 мм зразком є відрізок труби довжиною (300 ± 20) мм, кінці якого мають бути відрізаними механічним способом перпендикулярно до осі труби. Для труб діаметром понад 180 мм зразком є смуга довжиною (300 ± 20) мм і шириною 200 ... 300 мм, вирізана з відрізка труби.

Випробування проводять на трьох зразках.

Апаратура та устаткування:

- термостат з пристроєм, що перемішує рідину, і забезпечує підтримку заданої температури з відхиленням не більше $\pm 2^\circ\text{C}$;
- термометр з ціною поділки $0,5^\circ\text{C}$;

- рідина для наповнення термостату має бути нейтральною відносно випробовуваному матеріалу і стабільною при температурі випробування.

Підготовка та проведення випробування.

На зовнішню поверхню кожного зразка наносять три лінії паралельно осі труби на однаковій відстані по периметру або по ширині зразка. На кожній лінії роблять мітки на відстані не менше 100 мм один від одного і не менше 10 мм від торця зразка. Зразки перед випробуванням кондиціонують не менше 2 годин при температурі $(23\pm 3)^{\circ}\text{C}$.

На кожному зразку вимірюють відстань між двома мітками з похибкою не більше 0,25 мм при температурі $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$.

Температуру випробування і час витримки встановлюють відповідно до табл. 4.3. Зразки занурюють в рідину не менше ніж на 200 мм за допомогою підтримуючого пристосування, виключаючи зіткнення їх один з одним і зі стінками термостату.

Зразки витримують в термостаті при підвищеній температурі протягом заданого часу, виймають та кондиціонують не менше 2 годин при температурі $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ і вимірюють відстань між мітками.

Таблиця 4.3. Температури та часи витримки зразків труб, виготовлених з різних матеріалів при випробуваннях у рідкому середовищі

Матеріал	Умови випробування		
	Температура $^{\circ}\text{C}$	Час витримки, хв. при товщині стінки, мм	
		до 8 включно	більше 8
Полівінілхлорид непластифікований	150	15 + 1	30 + 1
Поліетилен високого тиску	100	15 + 1	30 + 1
Поліетилен низького тиску	110	15 + 1	30 + 1
Поліпропілен (гомополімер)	150	15 + 1	30 + 1
Поліпропілен (сополімер)	135	15 + 1	30 + 1

II. Метод визначення зміни довжини в повітряному середовищі

Метод полягає у вимірюванні відстані між двома мітками на поверхні зразка до і після його витримки в повітряному середовищі.

Вимоги до зразків ті ж самі, що при випробуваннях у рідкому середовищі.

Апаратура та устаткування:

- повітряна сушильна шафа з циркуляцією повітря, оснащена термостатуєм пристроєм, що забезпечує підтримку заданої температури з відхиленням $\pm 2^{\circ}\text{C}$; після розміщення зразків в сушильній шафі температура в ній має відновлюватись не більш ніж за 15 хв.;

- термометр з ціною поділки $0,5^{\circ}\text{C}$;

Підготовка та проведення випробування.

Температуру випробування і час витримки встановлюють відповідно до **табл. 4.4**. Зразки поміщають в сушильну шафу, виключаючи зіткнення їх один з одним і зі стінками шафи. Допускається розміщення зразків в горизонтальному положенні на шарі талька на полиці сушильної шафи.

Зразки витримують в сушильній шафі при заданих температурах і часі, виймають та кондиціонують не менше 2 годин при температурі $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ і вимірюють відстань між мітками.

Таблиця 4.4. Температури та часи витримки зразків труб, виготовлених з різних матеріалів при випробуваннях в повітряному середовищі

Матеріал	Умови випробування			
	Температура $^{\circ}\text{C}$	Час витримки, хв. при товщині стінки, мм		
		до 8 включно	від 8 до 16 включно	більше 16
Полівінілхлорид непластифікований	150	60 + 1	120 + 5	240 + 5
Поліетилен високого тиску	100	60 + 1	120 + 5	240 + 5
Поліетилен низького тиску	110	60 + 1	120 + 5	240 + 5
Поліпропілен (гомополімер)	150	60 + 1	120 + 5	240 + 5

Поліпропілен (сополімер)	135	60 + 1	120 + 5	240 + 5
-----------------------------	-----	--------	---------	---------

III. Обробка результатів.

За обома методами (випробування в рідкому та повітряному середовищах) відносну деформацію усадки труб (ε_y) у відсотках розраховують за формулою:

$$\varepsilon_y = [|L - L_0| / L_0] \cdot 100\% ,$$

де L_0 - відстань між мітками до прогріву, мм; L_2 - відстань між мітками після прогріву, мм; $|L - L_0|$ - абсолютне значення зміни довжини зразка.

До розрахунку береться максимальне значення $|L - L_0|$.

4.4.4. Метод визначення поздовжньої усадки профілів полівінілхлоридних

Поздовжню усадку [39] визначають за допомогою приладу, що зображений на рис. 4.13.

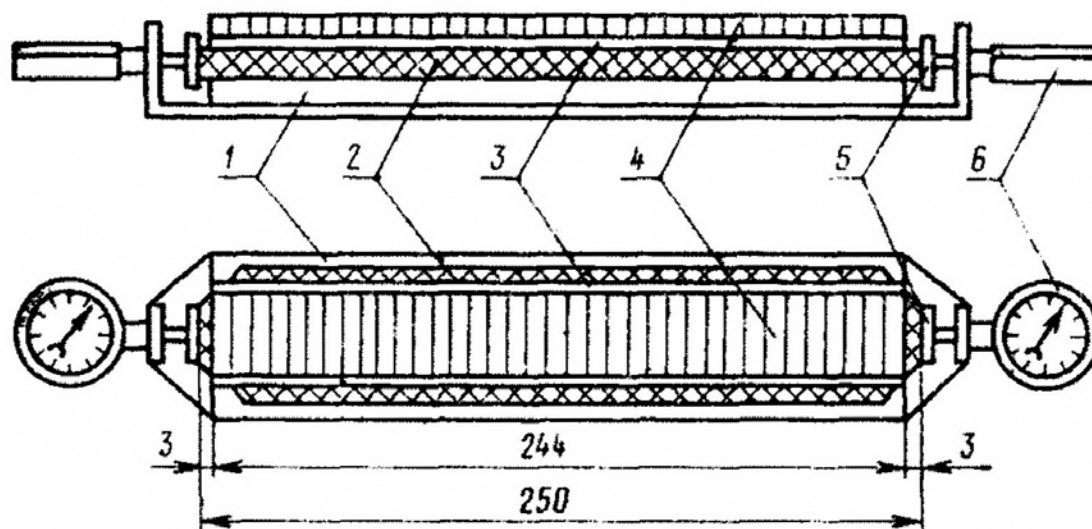


Рис. 4.13. Прилад для вимірювання температурної усадки ПВХ профілів: 1 - сталевая стрічка; 2 - випробуваний зразок; металевий вкладиш довжиною 244 мм; 4 - притискний вантаж; 5 - голівка індикатору з металевим диском діаметром 15 мм і товщиною 1 мм; 6 - індикатор з точністю вимірювання 0.01 мм

Для проведення випробувань відрізають три зразка довжиною 250 мм кожний. Зразок укладають лицевою стороною донизу на сталеву плиту 1 між дисками голівок індикаторів 5 таким чином, щоб вісь симетрії плоскої сторони зразка збігалася з осями голівок індикаторів, а торці зразка виступали за краї сталевих плит на 3 мм з кожної сторони.

Зразок вирівнюють за допомогою металевого вкладня 3 та притискного вантажу 4. Гвинтами індикаторів 6 диски їх голівок доводять до контакту із закругленими торцями зразка і за показниками індикаторів обчислюють початкову довжину зразка з погрешністю до 0,01 мм.

Надалі зразок розміщують в сушильній шафі, де його піддають термічній обробці протягом 5 годин при температурі $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$. Зразок виймають з сушильної шафи, охолоджують до температури $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, а потім вимірюють його у вказаній раніше послідовності і з тією ж похибкою.

Усадку ε_y у відсотках обчислюють за формулою

$$\varepsilon_y = [(L_1 - L_2) / L_1] \cdot 100\% ,$$

де L_1 - початкова довжина зразка, мм; L_2 - довжина зразка після термообробки, мм.

4.4.5. Метод визначення усадки поліетиленової термозбіжної плівки

Стандарт [60] розповсюджується на поліетиленову термозбіжну плівку, що виготовляється методом екструзії з наступним пневматичним розтягом, товщиною 0,03 ... 0,20 мм. Визначення усадки плівки проводять у повітряному або рідкому середовищі.

1. Метод визначення усадки у повітряному середовищі.

Випробування проводять у термостаті, який дозволяє встановлювати та підтримувати температуру $(180 \pm 5)^\circ\text{C}$. Для закріплення зразків використовують спеціальну рамку з гетинаксу або картону товщиною 2 мм (рис. 4.14).

Висота рамки 100 мм, ширина не менше 150 мм. Для обмеження закручування зразків під впливом температури на рамку зі зразками намотують під довільним кутом 2 ряди ниток, як показано на рис. 4.14, та встановлюють шкалу для вимірювання довжини зразків після усадки.

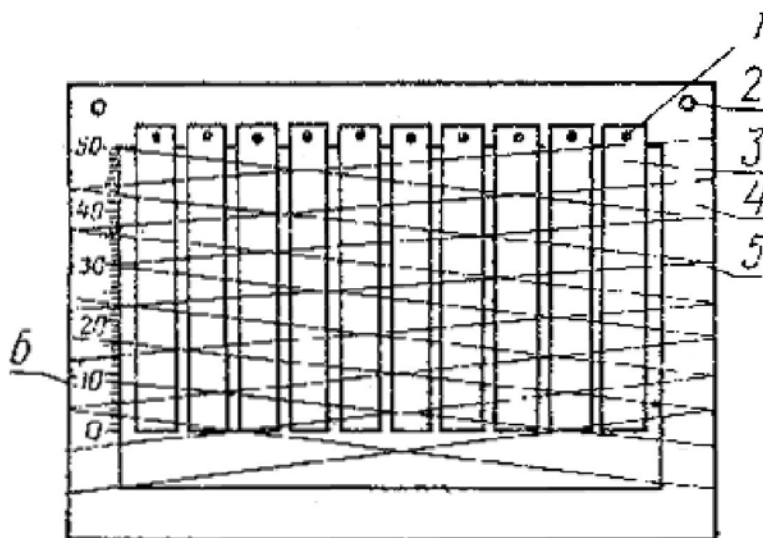


Рис. 4.14. Розміщення зразків на рамці: 1 - голки для кріплення зразків; 2 - отвори для закріплення рамки в термостаті; 3 - випробувальні зразки; 4 - рамка; 5 - нитки; 6 - шкала

Підготовка та проведення випробування.

Зразки для визначення усадки у формі прямокутної смужки розмірами 10×55 мм вирізають вздовж та поперек поздовжньої осі полотна плівки по 5 штук у кожному напрямку. Допустиме відхилення від розмірів ± 5 мм. На відстані 5 мм від краю зразка наносять мітку.

Після досягнення заданої температури $(180 \pm 5)^\circ\text{C}$, яку вимірюють з точністю 1°C , рамку зі зразками встановлюють у вертикальному положенні на штифти, що знаходяться в термостаті. Відстань до стінок має бути не більше 50 мм.

Час нагрівання зразків плівки товщиною до 0,05 мм має складати (30 ± 1) с, від 0,05 мм до 0,10 мм включно (40 ± 1) с, більше 0,10 мм (60 ± 1) с.

II. Метод визначення усадки у рідкому середовищі.

Метод відрізняється від попереднього тим, що випробування проводяться не в повітрі, а в силіконовому мастилі з низькою в'язкістю, гліцерині або гліколі.

Випробування проводять на смужках довжиною 150 мм шириною 15 мм або на зразках у формі квадрату зі стороною 100 мм. Зразки витримують при температурі $(125 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ протягом (10 ± 1) с. Допускається проводити випробування при температурі $(110 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ протягом (20 ± 1) с.

III. Обробка результатів.

За обома методами (випробування в повітряному та рідкому середовищах) усадку ε_y у відсотках обчислюють за формулою

$$\varepsilon_y = [(L_0 - L) / L_0] \cdot 100\% ,$$

де L_0 - початкова довжина зразка, мм; L - довжина зразка після усадки, мм.

В усіх описаних методах за результат випробувань приймають середнє арифметичне всіх визначень (окремо в поздовжньому і поперечному напрямках) і характеристики розкиду даних, що оцінюються за величинами середнього квадратичного відхилення [48].

4.5. Методи вимірювання температур розм'якшення

4.5.1. Вимірювання температур розм'якшення за Віка

Суть методу [49] полягає у визначенні температури, при якій стандартний індентор під дією навантаження проникає у випробовуваний зразок, що нагрівається з постійною швидкістю, на глибину 1 мм.

При випробуваннях пористих пластмас за цим методом визначають температури, за яких зразок під дією сили стискається на 1 мм.

Випробування проводять в рідкому або повітряному середовищі.

Метод призначений для порівняльних випробувань пластмас і передбачає застосування двох випробувальних навантажень: A – величиною близько 10 Н

або B - величиною близько 50 Н. Величина навантаження передбачається в стандартах або технічних умовах на пластмаси.

Вимоги до зразків.

Для випробування застосовують зразки у вигляді пластини товщиною від 3,0 до 6,4 мм. Розмір випробувальної поверхні має бути не менше 10 мм по довжині сторони прямокутника або діаметра кола. Випробувальна і протилежна їй поверхні зразка мають бути плоскими і паралельними.

Якщо товщина зразка перевищує 6,4 мм, її зменшують, обробляючи одну з поверхонь. Протилежна поверхня залишається необробленою і служить як випробувальна.

Допускається випробовувати зразки товщиною від 1,5 до 3,0 мм. У цьому випадку два зразка складають без видимих проміжків так, щоб їх загальна товщина перебувала в межах допустимих значень.

Зразки пористих пластмас повинні мати форму паралелепіпеда розмірами $(20\pm 1)\times(20\pm 1)\times(10\pm 0,5)$ мм.

Зразки повинні мати плоску поверхню без видимих дефектів пористої структури і механічної обробки.

Зразки мають бути виготовлені з дотриманням допусків на кривину і паралельність, передбачених в стандартах на методи випробувань, і не повинні мати раковин, сколів, здуттів, тріщин і інших дефектів, які можуть бути виявлені при зовнішньому огляді або дефектоскопії.

Для вимірювання розмірів зразка застосовують штангенциркуль із цифровою індикацією.

Кількість зразків, необхідна для випробування, встановлюється технічними умовами на пластмасу. При відсутності зазначених вимог (наприклад, при проведенні дослідницьких робіт з визначення характеристик нових матеріалів) мінімальна кількість зразків встановлюється згідно рекомендацій стандарту [48] з урахуванням вимог методів випробувань та точності визначення вимірювальної величини з заданою ймовірністю.

Апаратура та устаткування

Прилад для випробування за Віка складається з прикріпленого до штатива металевого стержня з несучою пластиною, індентора і вимірювального пристрою для визначення глибини вдавлення (рис. 4.15).

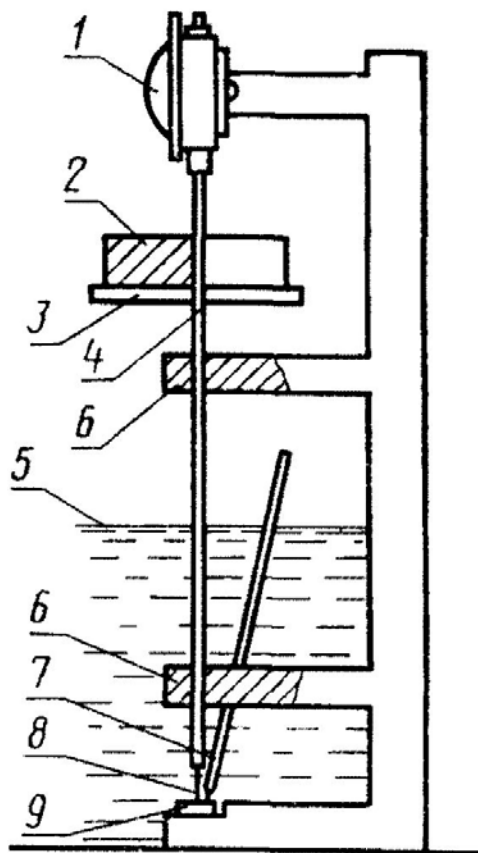


Рис. 4.15. Принципова схема приладу для вимірювання температури розм'якшення за Віка: 1 - вимірювальний прилад; 2 - вантаж; 3 - несуча пластина; 4 - металевий стержень; 5 - рівень рідини; 6 - напрямні втулки; 7 - засіб для вимірювання температури; 8 - індентор; 9 - зразок для випробувань

Прилад для випробування за Віка рекомендується виготовляти зі сплавів з низьким коефіцієнтом теплового лінійного розширення.

Металевий стрижень 4 з пластиною 3 для розміщення вантажів, укріплений в металевій рамі так, щоб він міг вільно переміщатися в вертикальному напрямку. Основа рами служить опорою для випробовуваного зразка 9.

Індентор 8 циліндричної форми з загартованої нержавіючої сталі довжиною 3 мм і площею поперечного перерізу $(1,0 \pm 0,015)$ мм² прикріплений до нижнього кінця металевого стержня 4. Нижня поверхня індентора має бути перпендикулярною до осі стержня і не повинна мати задирок.

При випробуванні пористих пластмас додатково використовують дві металеві пластинки розміром $(23 \times 23 \times 2)$ мм.

Вимірювальний прилад 1 реєструє досягнення глибини вдавлювання $(1,0 \pm 0,01)$ мм або вимірює стиснення зразка при випробуванні пористих пластмас.

Вантажі 2 для навантаження зразка мають бути розташовані на несучій пластині так, щоб центр ваги знаходився на осі металевого стержня. Загальна сила, прикладена до зразка, повинна знаходитися в межах: $(10 \pm 0,1)$ Н для способу А і $(50 \pm 1,0)$ Н для способу В.

Загальна маса стержня з індентором і пластиною для вантажу не повинна перевищувати 1 Н для забезпечення попереднього навантаження.

Якщо показання вимірювального пристрою, обумовлене різним тепловим розширенням елементів приладу для випробування за Віка, яке визначають в межах вимірюваних температур, замінивши випробуваний зразок зразком з боросилікатного скла або інвару, дорівнює або перевищує 0,02 мм, його значення для отриманої температури розм'якшення за Віка алгебраїчно додають до вимірювального пристрою.

Рідинний або повітряний термостат. Термостат забезпечує нагрівання середовища, що передає тепло, в яку поміщається зразок для випробування за Віка. При випробуванні в рідкому середовищі зразок повинен знаходитися не менше ніж на 35 мм нижче поверхні рідини. Термостат повинен бути забезпе-

чений регулятором, що забезпечує рівномірне підвищення температури зі швидкістю $(50\pm 5)^\circ\text{C}$ за годину або $(120\pm 10)^\circ\text{C}$ за годину.

Засіб для вимірювання температури середовища 7, що передає тепло, має забезпечувати вимір температури з похибкою не більше $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Підготовка та проведення випробування

Випробовуваний зразок поміщають на нижню поверхню основи штатива під індентор ненавантаженого стержня. Будь-яка точка поверхні індентора повинна знаходитися на відстані не менше 3 мм від краю випробовуваного зразка.

Зразок пористої пластмаси поміщають в центр нижньої металевої пластинки, а верхню пластинку встановлюють на зразок таким чином, щоб індентор дотикався центру площадки.

Прилад зі зразком занурюють в середовище, що передає теплоту. Засіб для вимірювання температури поміщають так, щоб датчик знаходився поруч зі зразком.

Випробування починають при температурі середовища, що передає тепло, на 50°C нижче очікуваної температури розм'якшення. Якщо передбачувана температура розм'якшення нижче 75°C , допускається розпочати випробування при температурі середовища 20°C .

Через 5 хв. поміщають вантажі на несучу пластинку і відзначають показання вимірювального пристрою або встановлюють його нульову позначку.

Температуру термостата рівномірно підвищують зі швидкістю $(50\pm 5)^\circ\text{C}$ за годину або $(120\pm 10)^\circ\text{C}$ за годину.

Температура занурення індентора в зразок на глибину $(1\pm 0,01)$ мм, є температурою розм'якшення за Віка для даного зразка.

Якщо під час випробування на одному зі зразків з'являться значні зміни (утворення тріщин, спучування і т.п.), які можуть вплинути на результат, випробування необхідно повторити.

Обробка результатів.

За температуру розм'якшення випробуваного матеріалу приймають середнє арифметичне значення вимірних температур, округлене до цілого градуса Цельсія, допустимі розбіжності між якими не повинні перевищувати 2°C при випробуванні в рідкому середовищі і 6°C при випробуванні в повітряному середовищі. Якщо розбіжності між окремими значеннями температури розм'якшення відрізняються від допустимих, то випробування повторюють.

Далі описаний один з варіантів конструкції та приладового забезпечення устаткування для визначення температури розм'якшення конструкційних пластмас та інших полімерних матеріалів, в якому враховано більшість вимог стандарту [49].

Випробувальний прилад типу Віка (рис. 4.16) складається з навантажувального пристрою, вимірювача деформації, нагрівального пристрою, системи регулювання і вимірювання температури.

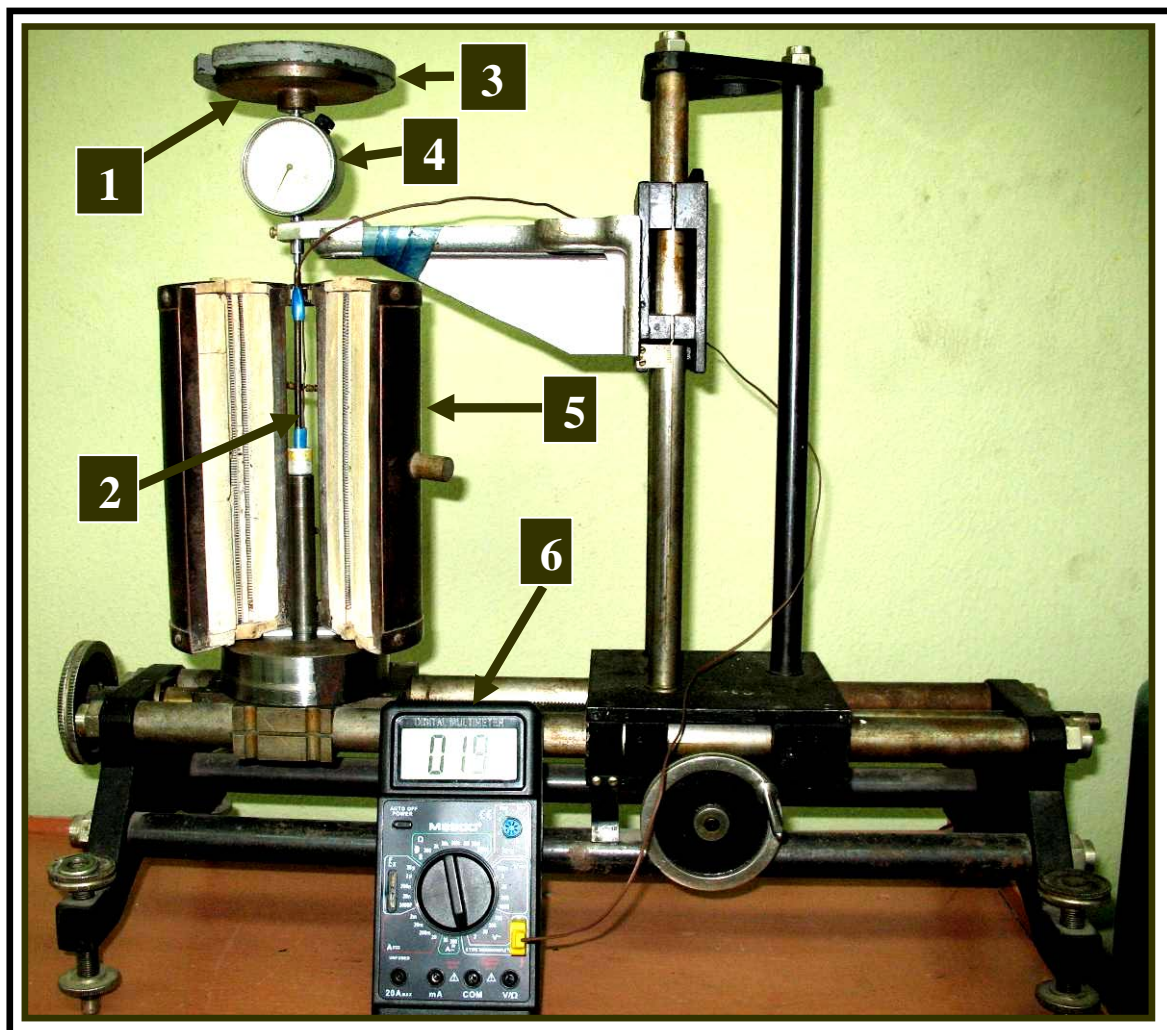


Рис. 4.16. Загальний вигляд випробувального приладу типу Віка: 1 – навантажувальний пристрій; 2 – індентор; 3 – змінний вантаж; 4 – вимірювач деформації (індикатор годинникового типу ИЧ-10); 5 – нагрівальний пристрій; 6 – цифровий вимірювач температури (прилад М890С⁺)

Навантажувальний пристрій складається із стрижня з площадкою для розміщення вантажів 1 і індентора 2 циліндричної форми, який знизу має плоско відшліфовану поверхню площиною 1 мм² (діаметр 1,13±0,01 мм).

Навантажувальний пристрій забезпечений вимірювачем деформації - індикаторною головкою ИЧ-10 4 та змінними вантажами 3. Вантажі забезпечують загальне навантаження на зразок 10±0,25 Н при навантаженні А або 50±0,25 Н при навантаженні Б. Вимірювач деформації 4 реєструє занурення індентора в зразок під дією навантаження.

Нагрівальний пристрій 5 забезпечує рівномірне підвищення температури повітряного середовища в термошафі із швидкістю 5±1°C за 6 хвилин або 50±5°C за годину.

Для вимірювання температури використовують цифровий прилад 6 (тип М890С⁺) з точністю вимірювання 0.1°C. Термопара приладу повинна знаходитися на рівні зразків в зоні їх розташування.

Режими випробування	
1). Навантаження силою 10 або 50 Н	2). Підвищення температури до стану розм'якшення матеріалу

Особливості випробувань
1). Реєстрація результатів вимірювань температури на цифровому табло
2). Можливість підтримувати встановлену швидкість зміни температури
3). Візуальна реєстрація температури проникнення індентора на глибину 1мм

Технічні дані приладу			
За навантаженням		За деформацією та температурою	
Максимальне випробу-	50,0	Максимальне переміщен-	100

вальне навантаження, Н		ня траверси, мм	
Межі зміни навантаження, Н	від 10 до 50	Діапазон швидкостей зміни температури, град/хв	від 0,5 до 1,0
Похибка вимірювання навантаження, %	не більше 1,0	Точність вимірювання переміщень, мм	0,01

4.6. Методи визначення температур крихкості та морозостійкості

4.6.1. Метод визначення температури крихкості пластмас при ударі

За методом [51] визначаються температури, при яких пластмаси з температурою крихкості нижче 20°C, які не є жорсткими при звичайній температурі навколишнього середовища, стають крихкими і руйнуються в заданих умовах деформації.

Визначення. Температура крихкості $T_{кр}$ - це температура, при якій досягається п'ятдесятипроцентна ймовірність руйнування зразків при випробуванні їх за даним методом.

Швидкість випробування - це швидкість руху ударного бойка випробувальної машини в напрямку випробувального зразка, закріпленого в затискувачі.

Суть методу полягає в згині консольно закріпленого зразка на кут 90° навколо оправки заданого радіуса при постійній (заданій) швидкості випробування в інертному (газоподібному чи рідкому) середовищі.

Апаратура та устаткування. Використовується прилад, що складається з затискувача для закріплення зразків, ударного бойка і механічного пристрою, що забезпечує нормальний взаємозв'язок всіх деталей і переміщення ударного бойка відносно випробовуваних зразків з постійною швидкістю.

Деталі ударного бойка і затискувача показані на рис. 4.17. На рис. 4.18 зображений затискувач з закріпленими в ньому зразками.

Для випробування застосовують ударний бойок, який приводиться в дію силою тяжіння.

Принципові розміри апаратури мають бути такими:

- радіус ударного бойка – $(1,6 \pm 0,1)$ мм;
- радіус нижньої лапки затискача – $(4,0 \pm 0,1)$ мм;
- відстань між точкою удару ударного бойка і затискачем – $(3,6 \pm 0,1)$ мм;
- зазор між краєм ударного бойка і затискачем – $(2,0 \pm 0,1)$ мм.

Швидкість випробування має складати $(2,0 \pm 0,2)$ м/с при ударі і при подальшому переміщенні не менше ніж на 5 мм.

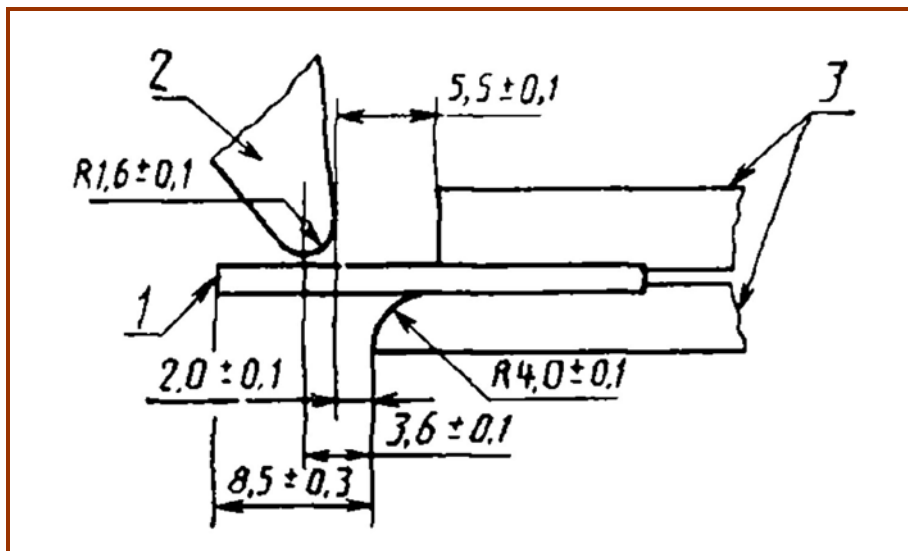


Рис. 4.17. Принципова схема затискання та навантаження зразка: 1 - випробувальний зразок; 2 - ударна кромка; 3 - затискне приладдя

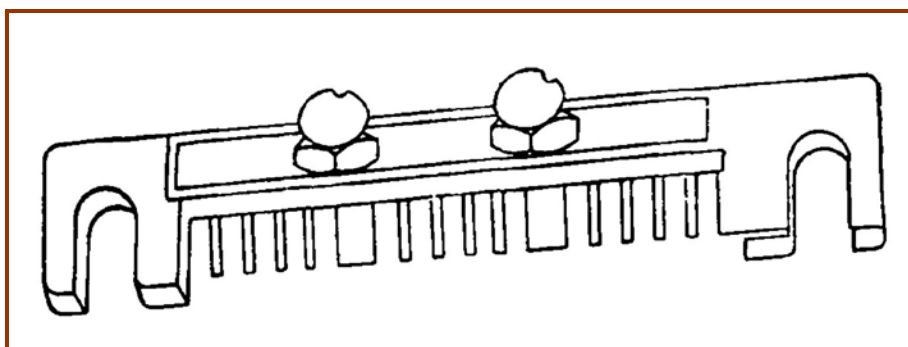


Рис. 4.18. Затискне приладдя з випробувальними зразками

Вимірювач температури (термометр або термопара), має охоплювати діапазон температур, за яких проводять випробування, і показувати температуру

з точністю $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Кульку термометра або мідь-константанову термопару слід поміщати найближче до зразка для випробування.

Теплопровідне середовище. Використовують рідке або газоподібне теплопровідне середовище, яке не робить помітного впливу на випробовуваний матеріал. Температуру теплообмінного середовища при випробуванні слід підтримувати з точністю $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Допускається для газоподібного середовища похибка підтримки і вимірювання температури в кріокамері на більше 1°C при температурах до -80°C і не більше 2°C при температурах нижче -80°C .

Вимоги до зразків. З листа, призначеного для випробування, вирізаються зразки довжиною $(20,0 \pm 0,25)$ мм, шириною $(2,5 \pm 0,05)$ мм і товщиною $(1,6 \pm 0,1)$ мм. Поверхня зразків має бути рівною і гладкою, без раковин, тріщин, сторонніх включень та інших видимих дефектів.

Кондиціонування. Зразки перед випробуваннями слід витримувати за ГОСТ 12423-66 при температурі $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості $(50 \pm 5)\%$. Зразки з надрізом кондиціонують після нанесення надрізу.

Проведення випробування. Зразки для випробувань надійно закріплюють в затискному приладді, яке поміщають у випробувальний прилад. При випробуванні зразків з надрізом надріз повинен знаходитися на бічній стороні зразка по дотичній до закругленої нижньої лапки затискача.

Зразки витримують при температурі випробування при використанні рідкого середовища 3 хв., при використанні газоподібного середовища 20 хв., що забезпечує досягнення рівноважного стану по температурі. Здійснюють удар, згинаючи зразки навколо оправки.

Зразки виймають з кріокамери і відзначають число зруйнованих зразків. Руйнування характеризується розломом на дві або більше частин або появою видимих тріщин.

Випробування проводять при чотирьох або більше температурах в діапазоні, в якому відбувається від 10 до 90% руйнувань (при визначенні нижчена-

веденим графічним методом 0 і 100% руйнування в розрахунок не приймається).

Випробовують не менше 100 зразків. При проведенні випробувань при чотирьох температурах при кожній температурі випробовують не менше 25 зразків. При проведенні випробувань при більшій кількості температур при кожній температурі можна випробувати меншу кількість зразків, але не менше 10.

4.6.2. Метод визначення температури крихкості пластмас при здавлюванні зразка, складеного петлею

За методом [52] визначаються температури крихкості при здавлюванні складених петлею зразків товщиною не більше 0,5 мм.

Стандарт передбачає два режими випробування: статичний і динамічний і три варіанти випробування: *A*, *B* і *B*. Вибір режиму і варіанти випробування передбачаються в стандартах та технічних умовах на пластмаси.

За варіантом випробування A (повного) визначають температуру, при якій 50% випробувальних зразків стають крихкими, руйнуючись при заданій деформації у встановлених умовах механічного впливу. Випробування складається з ряду дослідів, які проводять при кількох температурах, застосовуючи для кожного з них однакову кількість зразків. Після кожного дослід зразки оглядають і встановлюють відносну кількість зруйнованих зразків. На основі отриманих даних знаходять температуру крихкості аналітичним або графічним способом.

За варіантами випробування B і B (неповним) проводять дослід при одній певній температурі і встановлюють кількість зруйнованих та незруйнованих зразків. Варіанти *B* і *B* використовують в основному для заводського контролю.

Температура крихкості служить для порівняльної характеристики пластмас при заданих умовах випробування. Вона не є нижньою границею робочих температур виробів, оскільки ця границя залежить від конкретних умов експлуатації виробу.

Апаратура та устаткування. Випробування проводять на приладі, який містить такі основні частини: затискувач для закріплення зразків; пуансон для здавлювання зразка; нижня основа, на яку поміщають робочу частину зразка; морозильна камера; вимірювач температури.

Основні розміри і взаємне розташування затискувача, пуансона, нижньої основи та зразка в початковий і кінцевий моменти дії пуансона на зразок відповідають рис. 4.19.

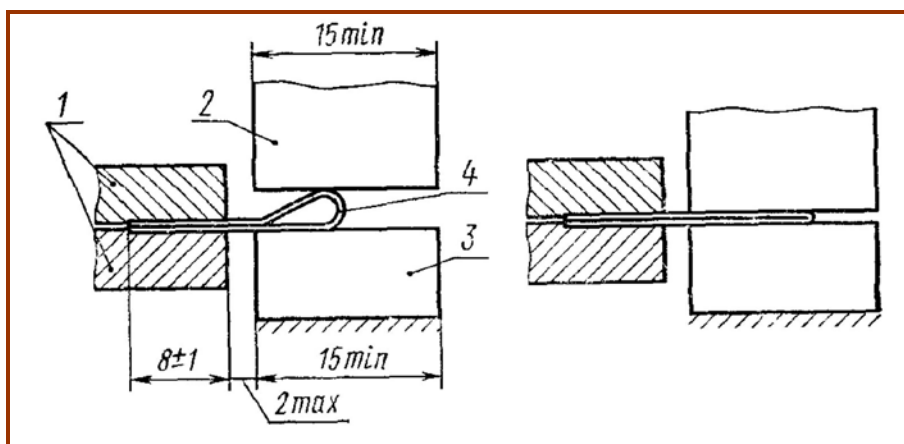


Рис. 4.19. Принципова схема затискання та навантаження зразка: 1 - затискувач; 2 - пуансон для здавлювання зразка; 3 - нижня основа; 4 - випробувальний зразок

Швидкість руху пуансона в процесі деформування зразка має становити: $(0,75 \pm 0,10) \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ - в статичному режимі; $(2,0 \pm 0,2) \text{ м/с}$ - в динамічному режимі.

Охолоджувальним середовищем в морозильній камері може бути повітря, а також інші гази і рідкі суміші (наприклад, етиловий спирт з твердим двоокисом вуглецю). Середовище має бути неагресивним по відношенню до випробуваної пластмаси.

Температура газового випробувального середовища підтримується з похибкою до $\pm 1,5^\circ\text{C}$ при температурах до мінус 80°C і з похибкою до $\pm 3^\circ\text{C}$ при більш низьких температурах. Температура рідкого випробувального середовища підтримується з похибкою до $\pm 1^\circ\text{C}$.

Вимірювач температури випробувального середовища повинен мати ціну поділки 1°C . При вимірюванні температури кулька термометра або робоча частина термопари повинні знаходитися поблизу місця розташування випробуваних зразків.

Вимоги до зразків. Зразки для випробувань повинні мати форму смужки довжиною (40 ± 1) мм, шириною $(6\pm 0,5)$ мм, товщиною $(0,5\pm 0,05)$ мм.

Кондиціонування. Зразки перед випробуваннями слід витримувати за ГОСТ 12423-66 при температурі $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості $(50\pm 5)\%$.

Проведення випробування.

Варіант А (повний). Температуру випробувального середовища в морозильній камері доводять до величини, близької до очікуваної температури крихкості випробовуваної пластмаси.

Зразки закріплюють затискувачами і поміщають в випробувальне середовище, де їх витримують при заданій температурі. Час витримки зразків в газовому середовищі має становити (5 ± 1) хв., в рідкому середовищі (2 ± 1) хв., відраховуючи від моменту встановлення заданої температури.

Після зазначеної витримки зразки в випробувальному середовищі за допомогою пуансона піддають деформації, виймають з камери і оглядають.

Якщо у зразку не виявлені явні ознаки руйнування (поділ на частини, великі тріщини), то його вручну здавлюють таким же чином, як це відбувалося в процесі випробування, і неозброєним оком оглядають поверхню зразка в місці перегину. При виявленні на поверхні зразка тріщини або будь-якого іншого ушкодження зразок вважають зруйнованим.

При кожній заданій температурі випробують не менше 10 зразків. Після їх огляду визначають кількість зруйнованих зразків у відсотках до числа випробуваних.

Варіанти Б і В (неповні). Випробування проводять, як передбачено у варіанті А, але при одній температурі, що встановлена в стандартах і технічних умовах на пластмаси.

За варіантом Б пластмаса вважається такою, що витримала випробування, якщо зруйнувалося не більше 5 з 10 випробуваних зразків.

За варіантом В пластмаса вважається такою, що витримала випробування, якщо не зруйнувався жоден з 5 випробуваних зразків.

Обробка результатів

Нижчеописаним способом визначають температуру крихкості пластмас за результатами випробувань, одержаних методом удару [51] та методом здавлювання петлі [52], варіант випробування А.

Результати обробляють аналітичним або графічним способами.

При аналітичному способі обробки результатів випробувань температуру крихкості в °С обчислюють за формулою:

$$T_{кр} = T' + \Delta T \cdot (S/100 - 0,5), \quad (4.1)$$

де T' - найвища температура, за якої руйнуються всі зразки, °С; ΔT - обраний температурний інтервал між послідовними випробуваннями, °К; $S = (N_T / N_{ЗАГ}) \cdot 100\%$ - відсоток зразків, що зруйнувалися при кожній температурі (від температури, що відповідає відсутності руйнування, до температури T' включно); N_T - число зразків, що зруйнувалися при температурі T ; $N_{ЗАГ}$ - загальна кількість зразків, випробуваних при температурі T .

При графічному способі обробки результатів випробувань будують графік залежності відсотку зруйнованих зразків від температури. Графік будують на координатній сітці (**рис. 4.20**), вісь абсцис якої має нерівномірну шкалу, що дає можливість представити графік у вигляді прямої лінії.

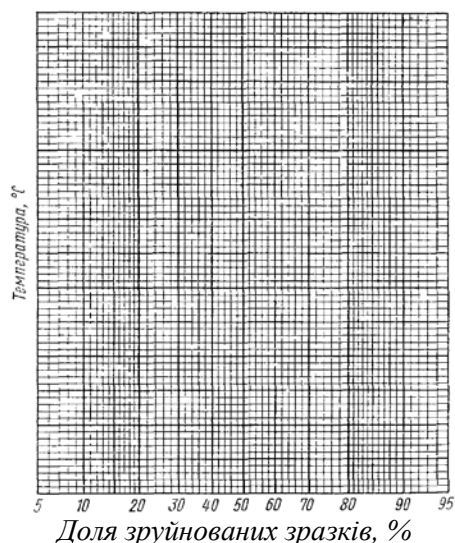


Рис. 4.20. Координатна сітка для графічної обробки результатів випробувань

По осі ординат відкладають температуру дослідів, а по осі абсцис - відсоток зруйнованих зразків. На отриманій прямій знаходять точку, абсциса якої дорівнює 50%; ордината її, значення якої округлюють до 1°C, є шуканої температурою крихкості.

Приклад обробки результатів випробувань

При випробуванні зразків пластмаси одержані такі результати:

Температура випробування, °C	Зруйновані зразки		Незруйновані зразки, шт.
	шт.	%	
-6	0	0	10
-8	3	30	7
-10	4	40	6
-12	8	80	2
-14	9	90	1
-16	10	100	0
-18	10	100	0

а) аналітичний спосіб

Застосовуючи формулу (4.1), одержуємо:

$$T' = -16^{\circ}\text{C}; \quad \Delta T = 2^{\circ}\text{C}; \quad S = 30+40+80+90+100 = 340\%;$$

$$T_{KP} = -16+2 (340/100-0,5) = -10,2 \approx \underline{\underline{-10^{\circ}\text{C}}}.$$

б) графічний спосіб

За результатами випробувань будують графік (рис. 3.7). Далі за графіком згідно вищенаведеного методу знаходять температуру, що відповідає руйнуванню 50% зразків. В даному випадку $T_{KP} = -9,9 \approx -10^{\circ}\text{C}$.

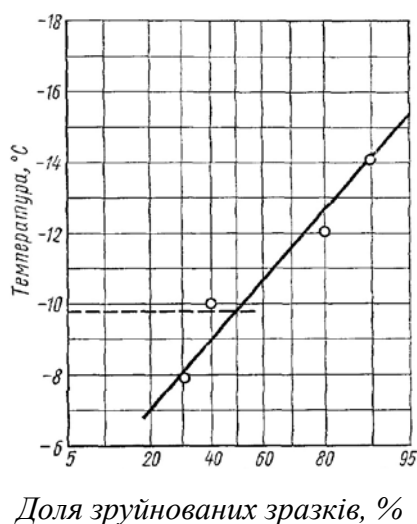


Рис. 4.21. Координатна сітка для графічної обробки результатів випробувань

4.6.3. Метод випробування ударним навантаженням на холоді виробів з полівінілхлориду

Стандарт [30] поширюється на вироби, які виготовлені з жорсткого полівінілхлориду (ПВХ). Виріб вважається таким, що пройшов випробування, якщо при визначенні опору ударним навантаженням на холоді (-15°C) число зруйнованих зразків не перевищує 10% від загальної кількості випробуваних зразків.

Вимоги до зразків. Відбирають 10 однакових зразків ПВХ завдовжки 300 ± 5 мм. Поверхня зразків має бути рівною і гладкою, без раковин, тріщин, сторонніх включень та інших видимих дефектів.

Апаратура та устаткування. Випробування проводять на установці, схема якої наведена на **рис. 4.22**. Спрямовуючі установки повинні мати заокруглену поверхню, яка дозволяє вільне, з мінімальною силою тертя, переміщення копра (ударного бойка). Опора копра повинна мати масу не менше 50 кг, маса копра (ударного бойка) повинна бути $(1 \pm 0,005)$ кг. Копер повинен мати напів-

феричну ударну поверхню $R_{C\Phi}=(25\pm 0,5)$ мм, шорсткість поверхні бойка – не більше $R_a=0,32$ мкм.

Підготовка до випробування. Перед випробуванням зразки витримуються в морозильній камері протягом однієї години при температурі -15°C . Відхилення від заданої температури має складати не більше -2°C .

Проведення випробування. Зразок встановлюється на упори таким чином, щоб бойок під час удару потрапляв у центр однієї з камер профілю.

Копер встановлюють на висоту (1500 ± 10) мм від поверхні зразка що випробується, а потім здійснюють удар.

Після випробувань зразки оцінюють візуально. Пошкодження (тріщини, відшарування та інші дефекти) можуть отримати не більше 10% зразків що випробовуються.

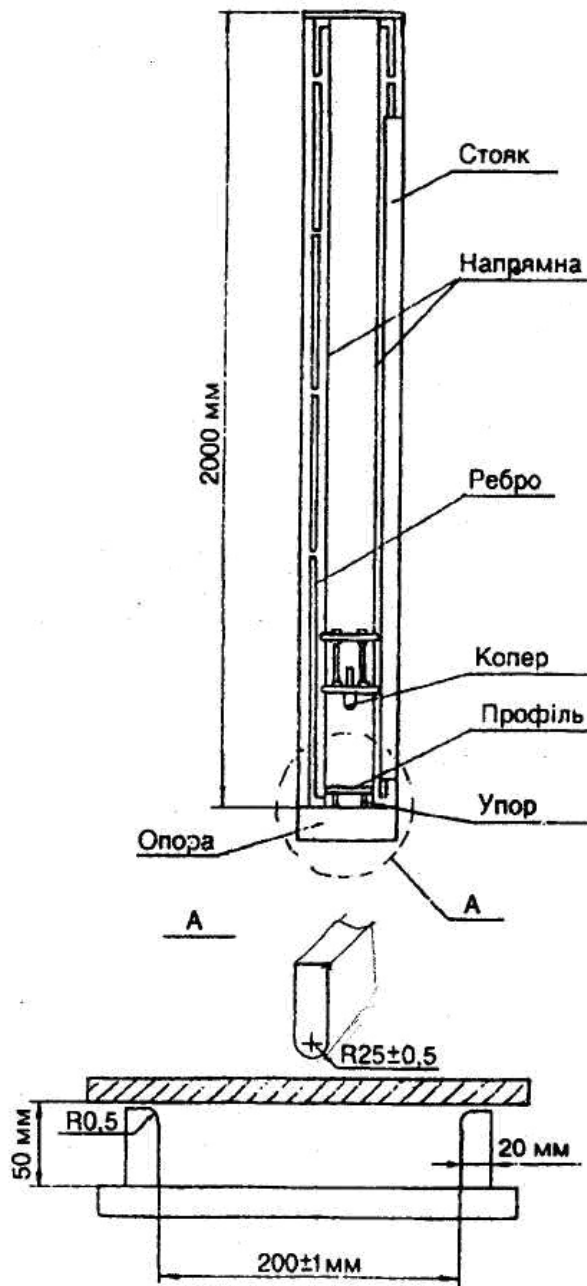


Рис. 4.22. Схема установки для перевірки виробу з ПВХ на ударну міцність на холоді

4.6.4. Метод визначення температурної границі крихкості гуми

Метод, що пропонується в стандарті [37], розповсюджується на гуму і встановлює порядок випробування гуми на крихкість при згині. Сутність мето-

ду полягає у визначенні температурної границі крихкості гуми – самої низької температури, за якої гума в умовах випробування не руйнується.

Вимоги до зразків. Для випробування застосовують зразки типів *A* або *B* у вигляді смужок, виготовлених із пластин товщиною $(2\pm 0,2)$ мм вирубним ножом. Ширина зразків обох типів $6,0\pm 0,5$. Довжина зразка типу *A* дорівнює 25^{+1} мм, типу *B* - 45_{-1} мм.

Примітка:

1. Якщо в нормативно-технічній документації по гумі, гумових виробках і методах їх випробувань нема вказівок про тип зразків, випробування проводять на зразку типу *A*.

2. Допускається випробування зразків, виготовлених з гумових виробів. При цьому способі виготовлення зразків місце на виробі, звідки вирізається зразок, і інші відомості приводять в нормативно-технічній документації на гумові вироби і методи їх випробування.

Зразки вирубують так, щоб напрям їх поздовжньої осі збігався з напрямком вальцювання. Кількість зразків при кожній температурі випробування повинна дорівнювати чотирьом.

Апаратура і матеріали. Випробування проводять за допомогою приладу, до складу якого входять:

- ударник для згину зразків;
- затискувач для консольного закріплення не менше чотирьох зразків;
- морозильна камера з рідким середовищем, обладнана пристроєм для перемішування середовища для забезпечення охолодження зразків до температури випробування, витримку і випробування їх при цій температурі.

Швидкість руху ударника при згині зразка має складати $(2\pm 0,2)$ м/с. Основні розміри і взаємне розташування затискувача, ударника і зразка перед згином наведені на (рис. 4.23).

Похибка приладу вимірювання температури середовища не повинна перевищувати $\pm 1^{\circ}\text{C}$ при температурах до -40°C та $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ – при температурах від -41°C до -80°C . Для вимірювань часу випробувань використовують секундомір або інші прилади з похибкою вимірювання не більше ± 5 с.

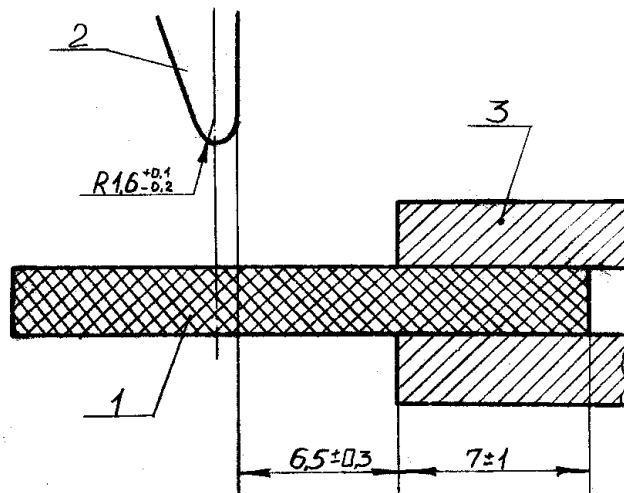


Рис. 4.23. Схема навантаження зразка для вимірювання температури крихкості гуми: 1 - зразок гуми; 2 - ударник для згину зразка; 3 - затискач

Проведення випробування. Температуру охолодження середовища доводять до значення величини, близької до очікуваної температури крихкості випробувальної гуми. Частина приладу, призначену для встановлення зразків, занурюють в криокамеру і витримують при температурі випробування не менше 10 хв. Закріплюють в затискачі чотири зразки і занурюють в охолоджену до температури випробування камеру. Зразки витримують протягом $(3 \pm 0,5)$ хв., починаючи з моменту встановлення заданої температури.

По закінченні цього часу по зразках, що знаходяться в камері, здійснюють ударником один удар. Повертають ударник в початкове положення, затискач зі зразком виймають з камери, зразки виймають із затискача та оглядають кожен зразок.

Зразок вважають зруйнованим за наявності хоча б однієї з таких ознак руйнування: розділення зразка на частини, наявність одної або кількох тріщин, розщеплення, викришування.

Випробування починають з температури, при якій очікується руйнування гуми, а якщо ця температура не відома навіть орієнтовно, її підбирають. Підвищуючи температуру з інтервалом 10°C , проводять випробування до темпера-

тури, за якої гума не руйнується. Потім температуру знижують на 8°C , проводять випробування при цій температурі і у випадку руйнування гуми підвищують температуру з інтервалом 2°C . Проводять випробування до тих пір, доки не буде встановлена температура, за якої гума не руйнується.

Найнижча температура, за якої не відбувається руйнування, являє собою температурну границю крихкості гуми.

Приклад визначення температурної границі крихкості гуми.

При температурі -70°C гума зруйнувалася. Підвищують температуру на 10°C , встановлюючи її на рівні -60°C , і проводять випробування. При цій температурі також встановлено руйнування гуми. Знову підвищують температуру на 10°C , встановлюючи її на рівні мінус 50°C , і проводять випробування. При цій температурі гума не зруйнувалася.

Знижують температуру на 8°C , встановлюючи її рівною -58°C , і проводять випробування. При цій температурі гума зруйнувалася.

Підвищують температуру на 2°C , встановлюючи її рівною -56°C , і проводять випробування. При цій температурі гума зруйнувалася. Знову підвищують температуру на 2°C , встановлюючи її рівною -54°C . При цій температурі гума не зруйнувалася. Температурна границя крихкості гуми дорівнює -54°C .

Приклад визначення температурної границі крихкості на відповідність вимогам нормативно-технічної документації.

У нормативно-технічної документації на гуми або гумові вироби зазначено, що температурна границя крихкості гуми повинна бути не вищою -50°C . У цьому випадку випробування проводять при температурі -50°C . Якщо жоден з чотирьох зразків не зруйнувався, це означає, що температурна межа крихкості гуми не вища -50°C . Якщо хоча б один зразок зруйнувався, це означає, що температурна межа крихкості випробуваної гуми вища -50°C .

4.6.5. Метод визначення морозостійкості гуми за еластичним відновленням після стиску

Метод, що описаний в стандарті [46], розповсюджується на гуму і встановлює порядок визначення її морозостійкості за еластичним відновленням після стиску. Суть методу полягає у визначенні здатності зразка, стисненого при температурі $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ і витриманого при низькій температурі, відновлювати свою висоту при низькій температурі після звільнення від навантаження.

Вимоги до зразків. Зразки для випробувань повинні мати форму циліндра висотою $(10 \pm 0,2)$ мм.

Апаратура і матеріали.

Прилад для випробування складається з таких частин: опорні і стискаючі площадки (рис. 4.24); пристрій для вимірювання висоти зразка; пристрій для навантаження і розвантаження зразка; кріостат та засіб вимірювання температури.

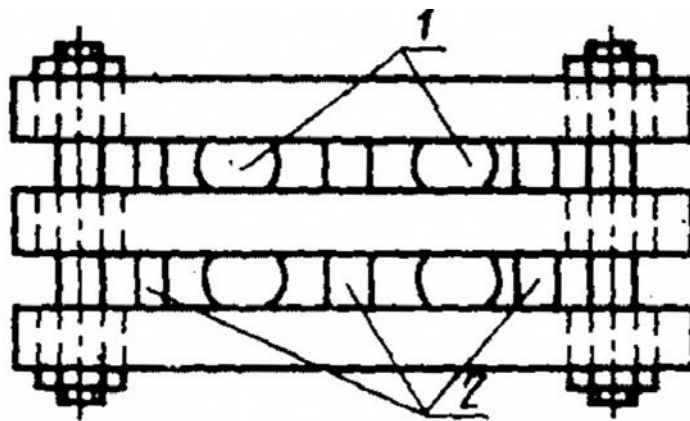


Рис. 4.24. Струбцина для стискування зразків: 1 - зразки; 2 - обмежувачі

Прилад для випробування має забезпечувати:

- вимірювання висоти зразка з похибкою не більше 0,05 мм;
- стиснення зразка до встановленої деформації за час, не більший 30 с.;

- звільнення зразка від навантаження за час, не більший 30 с, відновлення і вимір його висоти при температурі випробування;
- розміри площадок, щоб стиснений зразок не виступав за їх межі;
- витримку зразка в процесі випробування в рідкому середовищі при температурі від 0 до -70°C з перемішуванням рідини в кріостаті.

Похибка засобів вимірювання температури середовища в кріостаті не повинна перевищувати $\pm 1^{\circ}\text{C}$ при температурі до -40°C та $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ - при температурах від -41°C до -70°C . Для вимірювань часу випробувань використовують секундомір або інші прилади з погрішністю вимірювання не більше ± 5 с.

Підготовка та проведення випробування.

Перевіряють установку нуля вимірювача висоти зразків. Вимірювач висоти має встановлюватися на нуль в положенні, коли опорна і стискаюча площадки стикаються між собою, або показують з похибкою не більше 0,03 мм висоту калібру, встановленого між площадками.

Кріостат охолоджують до температури випробування. Частина приладу з опорним стискаючим площадками занурюють в кріостат і витримують при температурі випробування не менше 10 хв., потім виймають з кріостату і витирають опору, що стискає площадки, і прилеглі до них частини приладу.

Зразок розміщують між опорною і стискаючою площадками охолодженого приладу і вимірюють його початкову висоту h_0 .

Випробування проводять при деформації стиску зразка $(20\pm 2)\%$ від висоті стисненого зразка h_1 . Зразок стискають до висоти h_1 , потім частину приладу зі стисненим зразком занурюють в кріостат, підготовлений до роботи, і після досягнення в ньому заданої температури випробування витримують при цій температурі $5\pm 0,5$ хв.

Після закінчення зазначеного часу зразок звільняють від навантаження, не виймаючи його з кріостату. Звільнений від навантаження зразок витримують в кріостаті при температурі випробування протягом $3\pm 0,25$ хв., потім в цих самих умовах вимірюють висоту зразка h_2 .

Обробка результатів.

Коефіцієнт морозостійкості за еластичним відновленням після стиску (K_B) обчислюють за формулою:

$$K = \frac{h_1 - h_2}{h_0 - h_1},$$

де h_0 - висота зразка до стиснення, мм; h_1 - висота стисненого зразка, мм; h_2 - висота зразка після відновлення, мм.

За результат випробування приймають середнє арифметичне показників всіх випробуваних зразків, округлене до другого десяткового знака.

Метод рекомендується застосовувати при K_B не менше 0,20.

Питання для самоперевірки знань за розділом 4

- 1. Охарактеризуйте вплив температури на механічні властивості полімерів та конструкційних пластмас.*
- 2. Опишіть засоби для випробувань в умовах підвищених температур*
- 3. Опишіть засоби для випробувань в умовах знижених температур*
- 4. Яке обладнання використовується для вимірювання температурних деформацій пластмас?*
- 5. Як проводити вимірювання оптичними методами?*
- 6. Опишіть особливості процесу виникнення та розвитку температурних деформацій.*
- 7. Як визначити коефіцієнт температурного розширення пластмаси?*
- 8. Якими методами вимірюється теплова усадка полімерів?*
- 9. Які особливості вимірювання температурних деформацій різних виробів з полімерів?*
- 10. Опишіть методи вимірювання температури розм'якшення пластмас.*
- 11. Опишіть методи вимірювання температури крижкості пластмас.*

Список використаної та рекомендованої літератури

Підручники, монографії, статті

1. Ашкенази Е.К. Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. – Л.: Машиностроение, 1980 – 247 с.
2. Билибин А.Ю. Функциональные свойства полимеров: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 1998.
3. Гуль В.Е. Структура и прочность полимеров. - М.: Химия, 1971.- 344 с.
4. Джур Є.О. Полімерні матеріали в ракетно - космічній техніці: Підручник: – К.: Вища освіта, 2003.
5. Испытательная техника: Справочник. В 2-х кн./ Под ред. В.В.Клюева. – М.: Машиностроение, 1982 – Кн.1. – 528 с., – Кн.2. – 560 с.
6. Карпинос Д.М., Олейник В.И. Полимеры и композиционные материалы на их основе в технике. – К.: Наукова думка, 1987.
7. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. – М: Высшая школа, 1976. – 276с.
8. Колтунов М.А., Майборода В.П., Зубганинов В.Г. Прочностные расчеты изделий из полимерных материалов. – М: Машиностроение. 1983. – 239 с.
9. Композиционные материалы: Справ. / Под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнапольского. - М.: Машиностроение, 1990.- 512с.
- 10.Кравчук А.С., Майборода В.П, Уржумцев Ю.С. Механика полимерных и композиционных материалов. Экспериментальные и численные методы. – М.:Наука, 1985. – 303с.
- 11.Кулезнев В.Н., Шершнев В.А. Химия и физика полимеров. – М.: Высшая школа, 2003. – 304 с.
- 12.Малкин А.Я., Аскадский А.А., Коврига В.В. Методы измерения механических свойств полимеров.- М.: Химия, 1978. – 207 с.
- 13.Матвеев В.В. К определению демпфирующих свойств систем с амплитуднозависимым сопротивлением. Сообщение 1 // Проблемы прочности, 1970. № 5. С. 11-17
- 14.Матвеев В.В., Балюк А.Д. К определению демпфирующих свойств систем с амплитуднозависимым сопротивлением. Сообщение 2 // Проблемы прочности, 1970. № 12. С. 75-78
- 15.Нарисава И. Прочность полимерных материалов. - М.: Химия, 1987. – 400 с.

16. Огибалов П.М., Ломакин В.А., Кишкин Б.П. Механика полимеров. – М.: Изд-во МГУ. 1975. – 528 с.
17. Практикум по химии и физике полимеров / Под ред. В.Ф. Куренкова. – М.: Химия, 1990.—304 с.
18. Рысюк Б.Д., Носов М.П. Механическая анизотропия полимеров. – К.: Наук. думка, 1978. – 232с.
19. Уржумцев Ю.С., Максимов Р.Ф. Прогностика деформативности полимерных материалов. – Рига: Знание. 1975. – 416 с.

Методичні вказівки

20. Шидловський М.С. Нові матеріали [Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності «Динаміка і міцність машин» / НТУУ «КПІ». – К.: НТУУ «КПІ», 2009. –53с. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/125>
21. Шидловський М.С., Шпак Д.Ю. Нові матеріали. Частина 1: «Міцність і деформування полімерних та композиційних матеріалів при короткочасному навантаженні» [Електронний ресурс]: практикум до лабораторних робіт для студентів спеціальності «Динаміка і міцність машин» / – К.: НТУУ «КПІ», 2009. –37с. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/123>
22. Шидловський М.С., Шпак Д.Ю. Нові матеріали. Частина 2: «В'язкопружні властивості полімерних та композиційних матеріалів при тривалому навантаженні» [Електронний ресурс]: практикум до лабораторних робіт для студентів спеціальності «Динаміка і міцність машин» / – К.: НТУУ «КПІ», 2009. –45с. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/124>
23. Шидловський М.С., Бабенко А. Є., Боронко О. О., Трубачев С. І. 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» [Електронний ресурс] – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 41 с. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/16260>
24. Шидловський М.С., Бабенко А.Є., Боронко О.О., Трубачев С.І. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Нові матеріали» – Частина 4 «Температурні характеристики конструкційних пластмас та гум». Для студентів спеціальності «Прикладна механіка», спеціалізації «Динаміка і міцність машин» та «Інформаційні системи та технології в авіабудуванні» // – К.: НТУУ "КПІ", 2017. – 85 с. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/18955>
25. Шидловський М.С., Шпак Д.Ю. Нові матеріали [Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт «Методи вимірювання характеристик міцності та пружності конструкційних пластмас та

гум при короткочасному навантаженні» для студентів напрямку підготовки 6.050501 «Прикладна механіка» – К.: НТУУ «КПІ», 2011. –36 с. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/1541>

26. Шидловський М.С., Шпак Д.Ю., Тимошенко О.В. Нові матеріали [Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт «Обладнання для випробувань конструкційних пластмас та гум при короткочасному навантаженні» для студентів напрямку підготовки 6.050501 «Прикладна механіка», спеціальності «Динаміка та міцність машин» / – К.: НТУУ «КПІ», 2012. –48 с. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/1542>
27. Шидловський М.С., Боронко О.О., Шпак Д.Ю. Методи досліджень механічних властивостей матеріалів та виробів динамічними методами [Електронний ресурс]: практичний посібник для студентів напрямку підготовки 6.050501 «Прикладна механіка» / НТУУ «КПІ» – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 81 с. Доступ : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/7794>

Державні стандарти

28. ДСТУ 3021-95. Випробування і контроль якості продукції. Терміни і визначення [Текст]. – Введ. 1995–02–28. К.: Держстандарт України, 1995. – V, 75 с.
29. ДСТУ 2473-94. Механічні коливання. Терміни та визначення [Текст]. – Введ. 1995–01–01. К.: Держстандарт України, 1995. – 28 с.
30. ДСТУ Б В.2.6-15-99. Конструкції будинків і споруд. Вікна та двері полівінілхлоридні. Загальні технічні умови [Текст]. – Введ. 1999–12–03. – К.: Держбуд України, 1999. – X, 38 с. : ил.
31. ГОСТ 166-89. Штангенциркули. Технические условия [Текст]. – Введ. 1991–04–01. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – VII, 11 с. : ил.
32. ГОСТ 269-66. Резина. Общие требования к проведению физико-механических испытаний [Текст]. – Введ. 1966–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – III, 11 с. : ил.
33. ГОСТ 270-75. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении [Текст]. – Введ. 1978–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – V, 11 с. : ил.
34. ГОСТ 4651-78. Пластмассы. Метод испытания на сжатие [Текст]. – Введ. 1983–06–30. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – V, 7 с. : ил.
35. ГОСТ 4648-71. Пластмассы. Метод испытаний на статический изгиб [Текст]. – Введ. 1973–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – IV, 12 с. : ил.
36. ГОСТ 7762-74. Машины разрывные для испытаний резины и резиноканевых материалов [Текст]. – Введ. 1973–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – IV, 12 с. : ил.

- 37.ГОСТ 7912-74. Резина. Метод определения температурного предела хрупкости [Текст]. – Введ. 1976–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – III, 8 с. : ил.
- 38.ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение [Текст]. – Введ. 1980–12–01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – IV, 14 с. : ил.
- 39.ГОСТ 11529-86. Материалы поливинилхлоридные для полов. Методы контроля [Текст]. – Введ. 1987–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – VIII, 59 с. : ил.
- 40.ГОСТ 12015-66. Пластмассы. Изготовление образцов из реактопластов. Общие требования [Текст]. – Введ. 1967–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. –II, 5 с.
- 41.ГОСТ 12019-66. Пластмассы. Изготовление образцов для испытаний из термопластов. Общие требования [Текст]. – Введ. 1967–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1999. –II, 5 с.
- 42.ГОСТ 12020-72. Пластмассы. Метод определения стойкости к действию химических сред [Текст]. – Введ. 1973–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1997. – III, 20 с. : ил.
- 43.ГОСТ 12021-84. Пластмассы и эбонит. Метод определения температуры изгиба под нагрузкой [Текст]. – Введ. 1985–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – V, 5 с. : ил.
- 44.ГОСТ 12423-2013. Пластмассы. условия кондиционирования и испытания образцов (проб) [Текст]. – Введ. 2015–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2015. – VIII, 12 с.
- 45.ГОСТ 13731-68. Колебания механические. Общие требования к проведению измерений [Текст]. – Введ. 1969–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – V, 5 с.: ил.
- 46.ГОСТ 13808-79. Резина. Метод определения морозостойкости по эластическому восстановлению после сжатия [Текст]. – Введ. 1982–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – V, 5 с.
- 47.ГОСТ 14236-81. Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение [Текст]. – Введ. 1981–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – IV, 8 с.: ил.
- 48.ГОСТ 14359-69. Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования [Текст]. – Введ. 1970–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – IV, 10 с.
- 49.ГОСТ 15088-2014. Пластмассы. Метод определения температуры размягчения термопластов по Вика [Текст]. – Введ. 2015–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – IX, 16 с.: ил.

- 50.ГОСТ 15173-70. Метод определения среднего коэффициента линейного температурного расширения [Текст]. – Введ. 1970–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – V, 6 с.
- 51.ГОСТ 16782-92. Пластмассы. Метод определения температуры хрупкости при ударе [Текст]. – Введ. 1993–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – X, 8 с.: ил.
- 52.ГОСТ 16783-71. Пластмассы. Метод определения температуры хрупкости при сдавливании образца, сложенного петлей [Текст]. – Введ. 1997–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – V, 9 с.: ил.
- 53.ГОСТ 18616-80. Пластмассы. Метод определения усадки [Текст]. – Введ. 1980–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – III, 13 с.: ил.
- 54.ГОСТ 19111-77. Изделия погонажные профильные поливинилхлоридные. Технические условия [Текст]. – Введ. 1978–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – VI, 26 с.: ил.
- 55.ГОСТ 19873-74. Пластмассы. Резонансный метод определения динамических модулей упругости и коэффициентов механических потерь при колебаниях консольно-закрепленного образца [Текст]. – Введ. 1978–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – VI, 26 с.: ил.
- 56.ГОСТ 20480-75. Требования к испытательным машинам [Текст]. – Введ. 1978–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – VI, 26 с.: ил.
- 57.ГОСТ 20812-83. Пластмассы. Метод определения механических динамических свойств с помощью крутильных колебаний [Текст]. – Введ. 1984–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – V, 6 с.: ил.
- 58.ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1981–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 25 с.
- 59.ГОСТ 24347-80. Вибрация. Обозначения и единицы величин [Текст]. – Введ. 1981–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 6 с.
- 60.ГОСТ 25951-83. Пленка полиэтиленовая термоусадочная. Технические условия [Текст]. – Введ. 1985–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – VII, 14 с.
- 61.ГОСТ 26277-84. Пластмассы. Общие требования к изготовлению образцов способом механической обработки [Текст]. – Введ. 1985–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – IV, 10 с.: ил.
- 62.ГОСТ 27078-86. Трубы из термопластов. Методы определения изменения длины труб после прогрева [Текст]. – Введ. 1987–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – II, 4 с.
- 63.ГОСТ 9550-81. Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе [Текст]. – Введ. 1982–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – III, 9 с.: ил.

- 64.ГОСТ 24621-91. Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору) [Текст]. – Введ. 1993–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – IX, 7 с.: ил.
- 65.ГОСТ 4670-91. Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика [Текст]. – Введ. 1993–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – X, 8 с.
- 66.ГОСТ 19109-84. Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду [Текст]. – Введ. 1985–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – V, 8 с.: ил.
- 67.ГОСТ 4647-80. Метод определения ударной вязкости по Шарпи [Текст]. – Введ. 1981–06–01. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – V, 25 с.: ил.
- 68.ГОСТ 18197-82. Пластмассы. Метод определения ползучести при растяжении [Текст]. – Введ. 1983–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – V, 13 с.: ил.