

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

Шидловський М.С.

НОВІ МАТЕРІАЛИ: частина 1
СТРУКТУРА і МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
КОНСТРУКЦІЙНИХ ПОЛІМЕРІВ

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



Київ

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

2017

Шидловський М.С. Нові матеріали: частина 1 - Структура і механічні властивості конструкційних полімерів та пластмас. [Текст]: Навчальний посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» спеціалізації «Динаміка і міцність машин» – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 192 с.

*Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 7 від 26.06.2017 р.)*

На в ч а л ь н е в и д а н н я

**НОВІ МАТЕРІАЛИ: частина 1 -
СТРУКТУРА і МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
КОНСТРУКЦІЙНИХ ПОЛІМЕРІВ та ПЛАСТМАС**

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

Автор: *Шидловський Микола Сергійович*, канд. техн. наук, ст. наук. співр.

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

М.К. Кучер, д-р техн. наук, проф.

ЗМІСТ

	стор.
Умовні позначення	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. БУДОВА, СТРУКТУРА ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ПОЛІМЕРІВ	11
1.1. Основні поняття про конструкційні полімери	14
1.1.1. Будова полімерів	14
1.1.2. Класифікація полімерів	16
1.2. Основні класи полімерів	24
1.2.1. Органічні карболанцюгові полімери	24
1.2.2. Галогеновмісні полімери	35
1.2.3. Поліакрилати	42
1.2.4. Вінілові полімери з циклічними замісниками	47
1.2.5. Органічні гетероланцюгові полімери	52
1.3. Полімери з високими механічними показниками та полімерні композиційні матеріали	61
1.3.1. Пластмаси з підвищеними міцністю, модулем пружності, твердістю та ударною в'язкістю	61
1.3.2. Пластмаси з підвищеними теплостійкістю, нагрівостійкістю та низькими температурами крихкості	62
1.3.3. Властивості композиційних матеріалів з полімерною матрицею	63
1.3.4. Области застосування пластмас	66
РОЗДІЛ 2. ДЕФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРІВ ПРИ КОРОТКО-ЧАСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ	68
2.1. Структура аморфних полімерів	68
2.1.1. Особливості теплового руху макромолекул	70
2.1.2. Поняття про флуктуаційну сітку	71
2.2. Залежність деформацій від температури	72
2.2.2. Термомеханічна крива аморфного полімеру	72
2.2.3. Перехід у склоподібний стан	74
2.2.4. Механічні властивості в склоподібному стані	75

2.3. Механічні властивості кристалічних полімерів	79
2.3.1. Кристалічні структури та особливості кристалізації	79
2.3.2. Властивості кристалічних полімерів при розтягу	81
2.3.3. Температурні деформації кристалічних полімерів	83
РОЗДІЛ 3. ПОВЗУЧИСТЬ ТА РЕЛАКСАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ	96
3.1. Механічні моделі в'язко-пружності	96
3.1.1. Загальні уявлення про релаксаційні процеси	96
3.1.2. Моделі Максвелла, Кельвіна-Фойгта та Бюргерса	101
3.2. Основні рівняння спадкової в'язко-пружності	115
3.2.1. Поняття про спадкову в'язко-пружність	115
3.2.2. Рівняння повзучості та релаксації напружень	120
3.2.3. Вибір функцій впливу в рівняннях спадкової в'язко- пружності	127
3.3. Повзучість та релаксація полімерів в температурних полях ..	129
3.3.1. Обґрунтування методу температурно-часової аналогії	129
3.3.2. Практичне визначення коефіцієнтів функції ВЛФ та побудо- ва узагальнених криви	134
3.3.3. Практичне застосування методу ТЧА	136
РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ	139
4.1. Руїнування та довговічність полімерів	139
4.1.1. Часові залежності міцності полімерів, рівняння Журкова	140
4.1.2. Вплив швидкості деформування на міцність полімерів	143
4.1.3. Критерій Бейлі та його практичне застосування	146
4.1.4. Довговічність при циклічних навантаженнях	151
4.2. Міцність анізотропних композиційних матеріалі	153
4.2.1. Загальні відомості про композиційні матеріали	153
4.2.2. Основні рівняння, що описують анізотропію	175
4.2.3. Теорій міцності анізотропних матеріалів	184
Контрольні запитання	187
Список використаної та рекомендованої літератури	191

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

t – час;

$\varepsilon(t)$ – повна деформація;

ε_{np} – миттєво пружна деформація;

$\varepsilon_{ve}(t)$ – 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_n – границя лінійної в’язко-пружності матеріалу.

ВСТУП

У машинобудуванні до конструкційних відносяться матеріали, з яких виготовляються конструкції і деталі машин, що сприймають механічні навантаження.

У конструкціях матеріали можуть зазнавати різних впливів, пов'язаних, наприклад, з видом навантаження (розтяг, стиск, згин), характером дії навантаження (статичний, динамічний) і, нарешті, впливом навколишнього середовища (температури, вологості тощо).

Перераховані чинники визначають комплекс конструктивно-експлуатаційних вимог, що пред'являються до конструкційних матеріалів.

Здатність матеріалів задовольняти комплексу вимог виявляється при аналізі їх механічних властивостей, тобто характеристик, що визначають поведінку матеріалу під дією прикладених зовнішніх механічних сил.

При оцінці механічних властивостей матеріалів розрізняють декілька видів показників.

1. Показники властивостей матеріалів, які визначають незалежно від конструктивних особливостей і характеру служби виробів.

Ці показники вимірюють шляхом стандартних випробувань зразків на розтяг, стиск, згин та при випробуваннях на твердість. Характеристики міцності та пластичності, що визначають при статичних випробуваннях на гладких зразках, не повністю характеризують міцність матеріалу в реальних умовах експлуатації.

Отримані характеристики можуть бути використані лише для розрахунку деталей і конструкцій, що працюють за нормальних (кімнатних) умов і при дії статичних навантажень.

2. Показники конструктивної міцності матеріалів, що характеризують їх роботу в умовах експлуатації конкретного виробу.

До цих показників відносяться характеристики довговічності виробів (втомна міцність, зносостійкість, корозійна стійкість) і надійності матеріалу у виробі (в'язкість руйнування, енергія, що поглинається при розповсюдженні тріщини, живучість при циклічному вантаженні та інші характеристики).

Кількісні характеристики перерахованих властивостей визначаються при статичних і динамічних випробуваннях зразків з гострими тріщинами, аналогічних тим, що є в реальних деталях машин і конструкціях у вигляді надрізів, отворів, дефектів матеріалу (пор, мікропорожнин, чужорідних включень і тому подібне).

Окрім експлуатаційних вимог для конструкційних матеріалів беруться до уваги вимоги до *технологічності*. Технологічні властивості машинобудівних матеріалів повинні забезпечувати *якнайменшу трудомісткість* виготовлення деталей і конструкцій.

Технологічність характеризується здатністю матеріалу *набувати заданої форми* при дії різних чинників (температур, тисків та ін.), піддаватися *механічній обробці*, з'єднуватися різними методами (зварюванням, склеюванням) і так далі.

Особливе значення має технологічність матеріалу, а також *його вартість* при масовому виробництві.

* * *

Розробка та впровадження сучасного технічного обладнання тісно пов'язані із застосуванням великої кількості нових конструкційних матеріалів, серед яких одне з чільних місць займають конструкційні пластмаси та композиційні матеріали на основі полімерів.

Незважаючи на те, що метали та їх сплави мають високі механічні характеристики та інші експлуатаційні властивості, з розвитком сучасних

технологій виникла необхідність у пошуку і розробці нових конструкційних матеріалів.

Використовуючи нові способи виробництва матеріалів, фахівцями в області хімії, фізики і матеріалознавства були запропоновані нові типи пластмас, що характеризуються високими модулями пружності, підвищеною міцністю і малою повзучістю.

Були впроваджені конструкційні пластмаси, які можуть працювати в широких діапазонах температур, в агресивних середовищах, а також при тривалих циклічних навантаженнях. Унікальні фізико-механічні характеристики таких матеріалів (мала вага, висока питома міцність, корозійна стійкість) роблять їх незамінними в багатьох галузях промисловості та сприяють зниженню матеріаломісткості виробів.

При проектуванні обладнання та проведенні розрахунків на міцність та жорсткість необхідно знати основні механічні властивості нових матеріалів, більшість з яких до теперішнього часу досліджені недостатньо.

Тому кваліфікованим спеціалістам в області міцності та надійності необхідно оволодіти сучасними теоретичними та експериментальними методами досліджень з урахуванням супутніх факторів, знати методи обробки та тлумачення результатів експериментів.

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

Книга складається з 4-х розділів (глав):

У першому розділі описуються різні способи класифікації полімерів і пластмас.

У другому розділі розглядається взаємозв'язок між їх структурою і деформаційними властивостями.

У третьому розділі представлено аналітичний опис релаксаційних процесів (повзучість та релаксація напружень), які розвиваються в поліме-

рах у часі; розглядаються способи врахування впливу температури на в'язко-пружні властивості пластмас.

Четвертий розділ присвячений способам оцінки міцності полімерів та пластмас при короткочасних та тривалих навантаженнях.

При складанні даного посібника використано досвід автора, набутий при викладанні курсу лекцій «Нові матеріали» для студентів спеціальності «Динаміка і міцність машин» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

Частина результатів, наведених у посібнику, отримана автором особисто в процесі досліджень, проведених в лабораторії механіки полімерних і композиційних матеріалів.

РОЗДІЛ 1. БУДОВА, СТРУКТУРА ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ПОЛІМЕРІВ

Полімерами називають речовини, молекули яких складаються з великої кількості атомних угруповань (ланок), сполучених хімічними зв'язками в довгі ланцюги (макромолекули).

При цьому *кількість цих ланок* в макромолекулах має бути достатньою для прояву фізико-механічних властивостей полімерів, які залишаються незмінними при додаванні або видаленні однієї або декількох ланок.

Пластичні маси (пластмаси, пластики) – штучні матеріали, що отримують на основі полімерів.

Вони здатні розм'якшуватися при нагріванні і набувати заданої форми під тиском.

До складу пластичних мас входять:

- сполучна (та, що зв'язує) речовина (обов'язково), полімер;
- наповнювач (обов'язково);
- інші речовини (пластифікатори, отверджувачі, пігменти, антиоксиданти).

Сфери застосування полімерів і конструкційних матеріалів на їх основі:

- машинобудування (зубчасті колеса, підшипники, елементи конструкцій, корпуси механізмів тощо);
- транспорт (корпуси транспортних засобів, бампери, підшипники);
- хімічна промисловість (резервуари, труби) ;
- будівництво (облицювання, труби водопроводу);
- електро- і радіопромисловість (ізоляція, плати, корпуси)
- медицина (трубки, мембрани, корпуси апаратів);
- побутова техніка.

Особливе місце займають **конструкційні полімери**, що мають підвищену міцність та жорсткість.

Найбільш широко вживані полімери називають **великотоннажними** (поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид, полістирол, поліамід та ін.) - до 90% від загальної маси вироблюваних полімерів.

Переваги та недоліки полімерів:

Переваги:

- мала питома вага;
- висока питома міцність;
- висока корозійна стійкість;
- хороші ливарні властивості;
- хороша оброблюваність (фрезерування, точіння);
- відносно низька вартість.

Недоліки:

- відносно вузький температурний діапазон;
- труднощі вторинного використання;
- схильність до старіння при дії середовищ.

За експлуатаційними властивостями конструкційні пластмаси умовно діляться на такі групи:

- конструкційні;
- антифрикційні;
- теплостійкі;
- атмосферостійкі;
- важкозаймисті;
- зносостійкі;
- електроізоляційні;
- оптичні;
- теплоізоляційні.

Мета вивчення полімерів і матеріалів на їх основі

- навчитися робити **правильний (обґрунтований) вибір** матеріалів для роботи в тих або інших умовах. Від цього залежить техніко-економічна ефективність роботи конструкції;

- навчитися застосовувати методи **прогнозування** поведінки матеріалу для оцінки термінів служби конструкції;

- знати специфіку механічної поведінки матеріалу для правильного вибору **математичних моделей** при розрахунку деталей або конструкцій.

Під механічною поведінкою маємо на увазі процеси руйнування, деформування, втоми, старіння та інші процеси.

1.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО КОНСТРУКЦІЙНІ ПОЛІМЕРИ

1.1.1. БУДОВА ПОЛІМЕРІВ

Надалі використовуватимемо термінологію, прийняту у фізико-хімії полімерів.

Мономер – речовина, з якої отримують полімер. Кожна молекула мономера здатна утворювати одне або декілька ланок, що повторюються.

Ланка – угруповання, що багато разів повторюється, і є залишком мономера.

Олігомер (наприклад, етилен) – на відміну від полімеру, це речовина, властивості якої змінюються при видаленні або додаванні одного або декількох ланок.

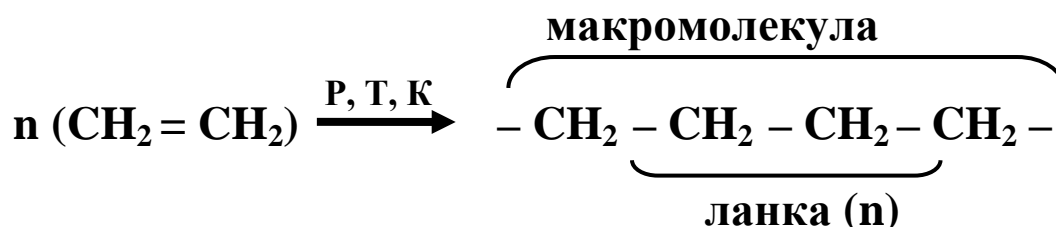
Макромолекула (полімерний ланцюг) - велика молекула, яка складається з ланок.

Ступінь полімеризації - число ланок в ланцюгу макромолекули.

Молекулярна маса макромолекули полімеру $M = n \cdot M_{\text{лн}}$, де $M_{\text{лн}}$ - молекулярна маса ланки

Уявлення про найпростіші полімери можна отримати на прикладі поліетилену - продукту полімеризації етилену.

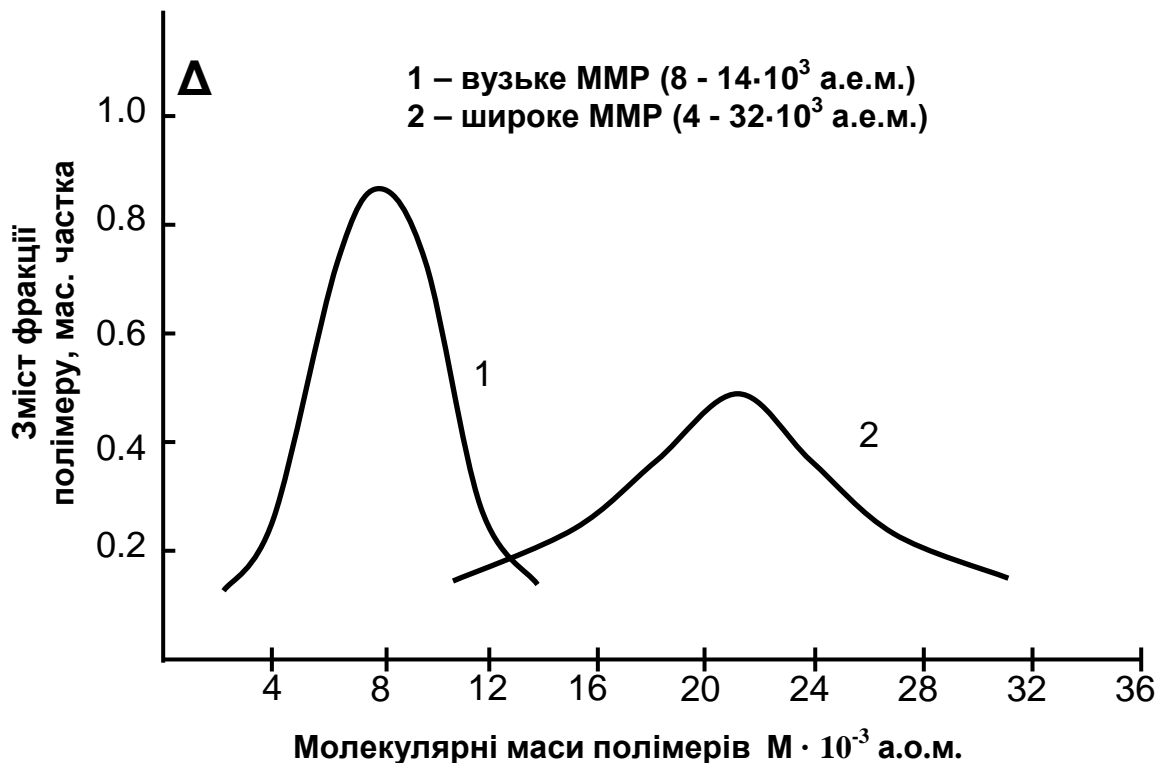
Реакція отримання поліетилену:



У скороченому вигляді хімічну формулу поліетилену записують наступним чином: $[\sim \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \sim]_n$.

На відміну від низькомолекулярних речовин, що характеризуються **постійною** молекулярною масою **M**, молекули одного і того ж полімеру (або високомолекулярного з'єднання, **ВМЗ**) можуть мати **різні маси M** (так звану **полідисперсність**).

Зазвичай полімери характеризуються молекулярно-масовим розподілом (**ММР**).



Фракція - частина полімеру, що складається з макромолекул приблизно однакового розміру;

а.о.м. - атомна одиниця маси;

Δ - вміст фракцій макромолекул певної маси.

До **високополімерів** відносять полімери з молекулярною масою

$$M = (5 \dots 10) \cdot 10^3 \text{ а.о.м.}$$

Підвищення вмісту високомолекулярних фракцій у полімері підвищує його міцність, твердість і теплопровідність.

1.1.2. КЛАСИФІКАЦІЯ ПОЛІМЕРІВ

Структурна класифікація полімерів

Різноманітність видів полімерів обумовлена ізомерією.

Ізомери – речовини, однакові за хімічним складом і з однаковою молекулярною масою, але різні за будовою.

Для зручності створено декілька видів класифікацій полімерів:

- за видом надмолекулярної структури;
- за загальною структурою макромолекул;
- за структурою основного ланцюга;
- за загальним хімічним складом;
- за хімічним складом основного ланцюга;
- за конфігурацією макромолекул;
- за способом отримання;
- за здатністю до плавлення.

I. За видом надмолекулярної структури (за фазовим станом матеріалу):

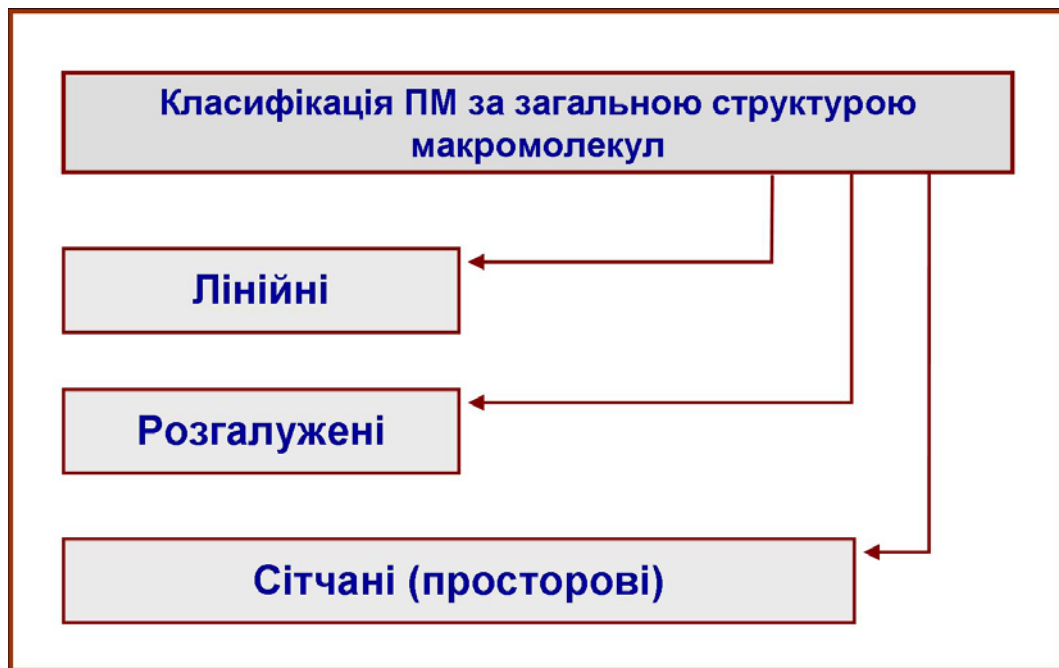


– **аморфні полімери** – полімери, макромолекули яких, в цілому, не впорядковані, спостерігається лише "близький порядок" в розташуванні;

– *кристалічні полімери* – полімери, макромолекули яких впорядковані, спостерігається "далекий порядок" (до декількох тисяч макромолекул).

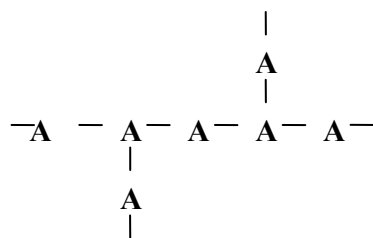
Спостерігаються такі *види кристалітів*: голчасті, ламелі (пластинчасті), глобули (сфероїдальні).

II. За загальною структурою макромолекул:

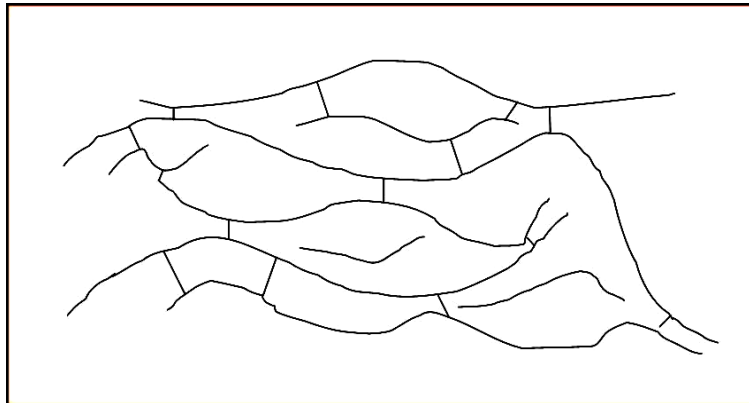


– *лінійні полімери* - такі, що побудовані з одного або різних типів мономерів, з'єднаних у довгі ланцюги типу **-A-A-A-** **-A-B-A-B-** **-A-A-B-A-B-B-** ... (A, B - ланки);

– *розгалужені полімери* - такі, що являють собою довгий ланцюг (головний) з бічними відгалуженнями:



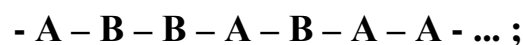
– **сітчані полімери** (або просторові) - полімери, побудовані з довгих ланцюгів, з'єднаних в тривимірну сітку поперечними зв'язками:



III. За структурою основного ланцюга:



- **гомopolімери** - полімери, що складаються з однакових ланок;
- **співполімери** (або змішані полімери) - полімери, ланцюги яких містять кілька типів мономерних ланок;
- **статистичні** (або нерегулярні) – полімери, ланки яких розташовані безладно



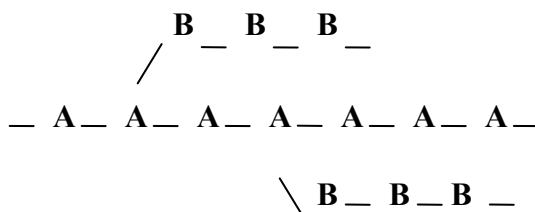
– *такі, що чергуються* – спостерігається правильне чергування ланок



– *блок-сополімери* – такі, що складаються з ділянок з однаковими ланками



– *прищеплені сополімери* – полімери, у яких до основного ланцюгу приєднані макромолекули іншого мономеру



IV. За загальним хімічним складом:



– *органічні* – полімери, що містять атоми вуглецю, водню, галогенів (Cl, F), кисню, азоту або сірки (так звані органогенні елементи);

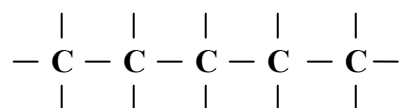
– *елементоорганічні* – полімери, що містять, крім органогенних, такі елементи, як кремній, алюміній, титан та інші;

– *неорганічні* – в основному ланцюзі і бічних ланках атоми вуглецю відсутні.

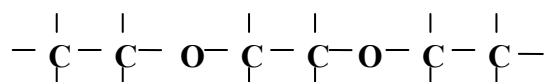
V. За хімічним складом основного ланцюга:



– *гомоланцюгові* – полімери, в основній частині яких містяться атоми лише одного елемента; якщо в основній частині містяться лише атоми вуглецю, то це *карболанцюгові полімери* (поліетилен - ПЕ, полівінілхлорид - ПВХ, полістирол - ПС, поліметилметакрилат - ПММК та інші):



– *гетероланцюгові* – полімери, основна частина яких складена з різних атомів (C - O, N - C, C - S ...):



Структура полімерів характеризується конфігурацією і конформацією.

Конфігурація макромолекул – певне строге чергування атомів в макромолекулі, що не змінюється в процесі теплового руху.

Ці макромолекули є стабільними ізомерами, оскільки вони не змінюються в часі.

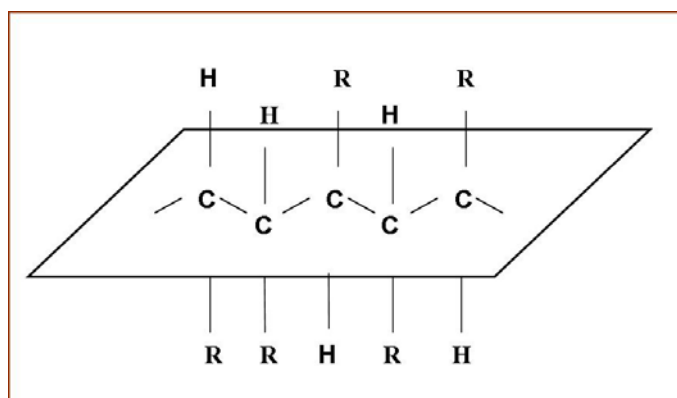
Конформація макромолекул – тимчасове просторове розташування атомів, яке може змінюватися під дією теплового руху без руйнування хімічних зв'язків між цими атомами або групами атомів.

VI. За конфігурацією макромолекул:



– *атактичні (нерегулярні)* – це полімери, у яких атоми в головному ланцюзі з різними заміниками чергуються хаотично, нерегулярно.

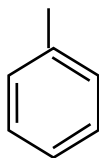
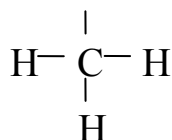
Їх будова схематично показана на малюнку, де зигзагоподібний головний ланцюг для наочності поміщений в одну площину:



На рисунку позначено:

H – водень,

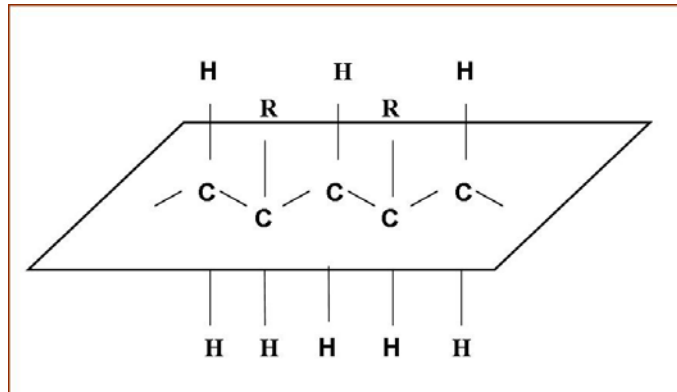
R – органічний радикал (замінник), наприклад,



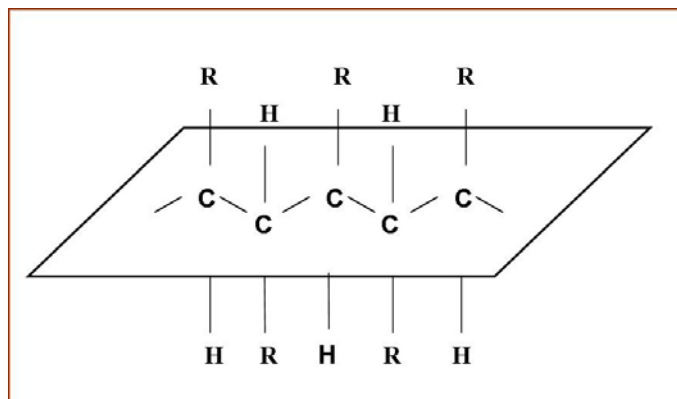
- циклічний замітник.

– *стереорегулярні* – це полімери, в яких замітники знаходяться, по відношенню до головного ланцюга, в регулярній послідовності. Ці полімери у свою чергу діляться на:

– *ізотактичні*, в яких замітники знаходяться по один бік від головного ланцюга, наприклад:



– *синдіотактичні*, в яких замітники знаходяться по різні боки від головного ланцюга:



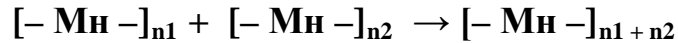
VII. За способом отримання полімери поділяються на:

– *полімеризаційні* – полімери, утворені в процесі синтезу за ланцюговим механізмом шляхом послідовного приєднання n молекул мономеру до реакційних (активних) центрів, що знаходяться на кінцях зростаючого ланцюга:



Mn – мономер

– *поліконденсаційні* – полімери, утворені шляхом ступінчастого процесу синтезу макромолекул при взаємодії один з одним реакційних центрів всіх реагентів системи:



VIII. За здатністю до плавлення розрізняють дві групи полімерів:

Термопласти – лінійні чи помірно розгалужені полімери, що здатні плавитися при багаторазовому нагріванні (ПЕ, ПС, ПВХ та інші). Їх структура закладається вже в процесі синтезу, і переробка зводиться до нагрівання, переходу у в'язко-текучий стан і надання під тиском потрібної форми з наступним охолодженням.

Реактопласти – полімери, що тверднуть з утворенням неплавких і нерозчинних зшитих продуктів (фенолформальдегідні, епоксидні, резольні смоли та інші).

Наявність тієї або іншої структури полімерів, розгалуженість макромолекули, хімічний склад, наявність певного виду ізомерії, молекулярна вага і ММР та інші особливості надають полімерам специфічних фізико-механічних властивостей.

Впливаючи на структуру полімеру, можна створювати принципово нові матеріали з наперед заданими властивостями.

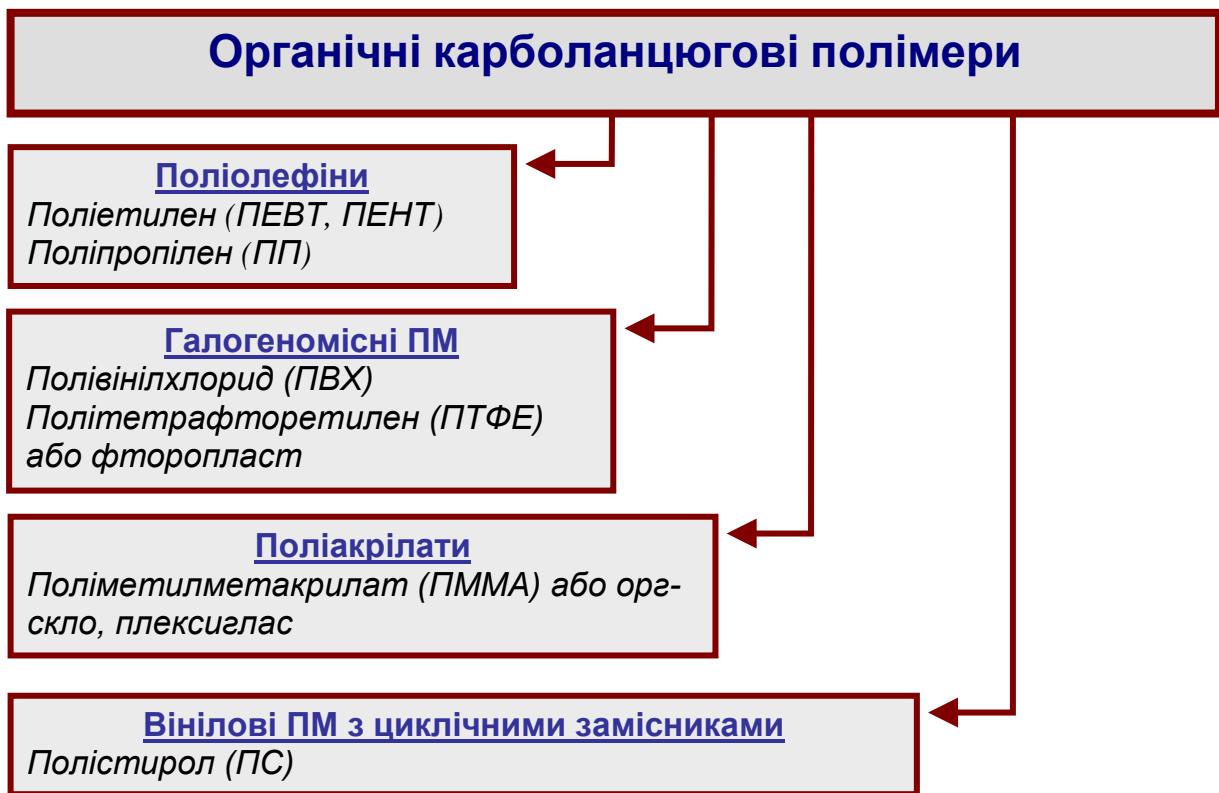
1.2. ОСНОВНІ КЛАСИ ПОЛІМЕРІВ

1.2.1. ОРГАНІЧНІ КАРБОЛАНЦЮГОВІ ПОЛІМЕРИ

Це найбільш поширений клас полімерів. До нього належать практично всі «великотонажні» полімери.

Характеризується наявністю в головному ланцюзі тільки атомів вуглецю. В основному це лінійні і частково кристалічні полімери.

Зазвичай використовують таку класифікацію:



В схему включені лише найбільш поширені органічні карболанцюгові полімери.

Поліолефіни

Ці ПМ мають відносно високу міцність, досить стійкі до дії агресивних середовищ (за винятком сильних окисників), легко обробляються.

Недолік - погана адгезія до всіх матеріалів, невисока жорсткість (що обмежує застосування їх як конструкційних матеріалів).

Поліетилен високого тиску (ПЕВТ)

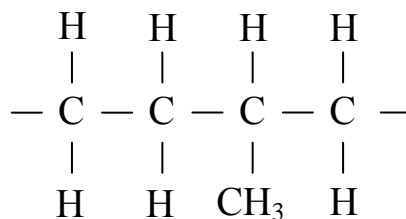
Часто називається «Поліетилен низької густини» (ПЕНГ).

У зарубіжній літературі - LDPE (Low-Density Polyethylene).

1. Структура: лінійний термопластичний матеріал зі ступенем кристалічності 50-65%.

2. Спосіб отримання: полімеризація етилену за тиску $P = 130-250$ МПа і температурі $T = 190-300$ °С.

3. Хімічна будова:



Кількість радикалів $\text{CH}_3 \approx 15 \dots 25$ на 1000 атомів С.

4. Фізико-механічні характеристики ПЕВТ:

Характеристики міцності	міцність при розтязі σ_p , МПа при стиску $\sigma_{ст}$, МПа при згині $\sigma_{зг}$, МПа границя текучості σ_T , МПа максимальна деформація ε_{max} , % деформація на межі текучості ε_T , %	7 ... 15 ≈ 12 12 ... 17 7 ... 14 до 600 15 ... 20
Модулі пружності	при розтягу E_p , МПа при згині $E_{зг}$, МПа	90 ... 220 140 ... 250
Ударна в'язкість, твердість	ударна в'язкість $a_{б.н}$, a_n , кДж/м ² твердість за Брінелем H_B , МПа	не руйнується 14 ... 25
Температурні характеристики	температура розм'якшення за Віка, °С температура плавлення, °С температура крихкості, °С	90 ... 110 120 ... 135 -45 ... -120
Інші характеристики	густина ρ , г/см ³ водопоглинання за 24 години, % деформація литтєвої усадки, %	0.91 ... 0.93 $\approx 0,02$ 2.0 ... 3.0

Примітка: $a_{б.н}$ - ударна в'язкість зразків без надрізу; a_n - ударна в'язкість зразків з надрізом.

5. Способи переробки і обробки:

- лиття під тиском, екструзія, пневмо - і вакуум - формування,
- пресування, спікання, зварювання, напилення.

6. Переваги і недоліки:

Переваги в порівнянні з іншими полімерами	Основні недоліки
<i>висока еластичність</i>	<i>відносно низькі границі міцності і текучості</i>
<i>висока морозостійкість</i>	<i>низька стійкість до масел і жирів</i>
<i>висока стійкість до агресивних середовищ</i>	<i>низька стійкість до ультрафіолетових променів</i>
<i>мале водопоглинання</i>	<i>невисока температура експлуатації</i>
<i>висока радіаційна стійкість</i>	<i>не вогнестійкий</i>
<i>біологічно не шкідливі</i>	<i>зниження механічних властивостей при підвищенні температури</i>
<i>стійкість до старіння при підвищених температурах</i>	<i>зниження хімічної стійкості в напруженому стані</i>

7. Области застосування і види виробів з ПЕВТ:

Машинобудування	<i>прокладки і шайби захисні корпуси і кожухи</i>
Хімічна промисловість	<i>листи та плити для футерування апаратів і резервуарів</i>
Будівництво	<i>безнапірні труби і фасонні частини</i>
Електропромисловість	<i>ізоляція кабелів</i>
Сільське господарство	<i>плівка для теплиць</i>
Торгівля	<i>плівка пакувальна, посудини і бутлі, предмети побутового призначення</i>

Поліетилен низького тиску (ПЕНТ)

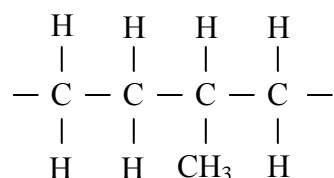
Інша назва - «Поліетилен високої густини» (ПЕВГ).

У зарубіжній літературі - **HDPE (High-Density Polyethylene)**.

1. Структура: лінійний термопластичний полімер зі ступенем кристалізації 70-85%.

2. Спосіб отримання: полімеризація етилену при тиску $P=1$ МПа і температурі $T=80^{\circ}\text{C}$ з застосуванням каталізаторів.

3. Хімічна будова:



Кількість радикалів $\text{CH}_3 \approx 3 \dots 6$ на 1000 атомів С.

4. Фізико-механічні характеристики ПЕНТ:

Характеристики міцності	міцність при розтязі σ_p , МПа при стиску $\sigma_{ст}$, МПа при згині $\sigma_{зг}$, МПа максимальна деформація ε_{max} , %	18 ... 26 20 ... 36 20 ... 38 до 1000
Модулі пружності	при розтязі E_p , МПа при згині $E_{зг}$, МПа	610 ... 750 650 ... 760
Ударна в'язкість, твердість	ударна в'язкість $a_{б,н}$, кДж/м ² ударна в'язкість a_n , кДж/м ² твердість за Брінелем H_B , МПа	не руйнується від 2 48 ... 52
Температурні характеристики	температура експлуатації T_{max} , $^{\circ}\text{C}$ температура розм'якшення за Віка, $^{\circ}\text{C}$ температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$ температура крихкості, $^{\circ}\text{C}$	50 125 ... 128 120 ... 125 -60 ... -150
Інші характеристики	густина ρ , г/см ³ водопоглинання за 24 години, % деформація литтєвої усадки, %	0.94 ... 0.97 до 0,03 1.0 ... 4.0

Примітка: $a_{б,н}$ - ударна в'язкість зразків без надрізу; a_n - ударна в'язкість зразків з надрізом; T_{max} - температура, при якій протягом 10 років всі механічні та електричні властивості змінюються не більше, ніж на 50%.

5. Способи переробки і обробки:

- лиття під тиском, екструзія, пресування, зварювання,
- напилення, ротаційна формовка.

6. Переваги і недоліки ПЕНТ:

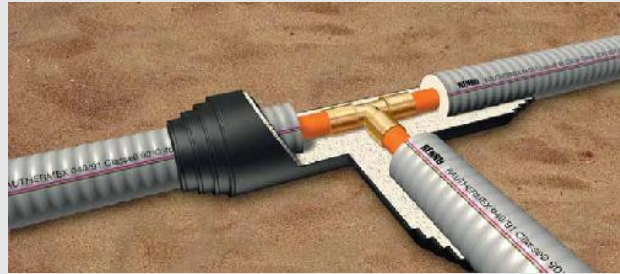
Переваги в порівнянні з іншими полімерами	Основні недоліки
<i>велика міцність порівняно з ПЕВТ</i>	<i>низький модуль пружності</i>
<i>більша теплостійкість</i>	<i>зниження механічних властивостей при підвищенні температури</i>
<i>висока ударна міцність</i>	
<i>відсутність розтріскування</i>	<i>висока повзучість під навантаженням</i>
<i>мале водопоглинання</i>	
<i>хімічна стійкість</i>	<i>невисока температура експлуатації</i>
<i>стійкість до старіння</i>	

7. Області застосування і види виробів з ПЕНТ:

Машинобудування	<i>кришки підшипників, втулки захисні корпуси і кожухи антифрикційні покриття</i>
Хімічна промисловість	<i>тара для зберігання кислот і лугів</i>
Транспорт	<i>паливні баки</i>
Будівництво	<i>облицювальні листи і декоративні профілі</i>
Електропромисловість	<i>електроізоляційні покриття</i>
Сільське господарство	<i>плівка для теплиць</i>
Торгівля	<i>плівка пакувальна, посудини і бутлі, предмети побутового призначення</i>

Вироби з поліетилену

Труби і фітінги



Вироби з поліетилену

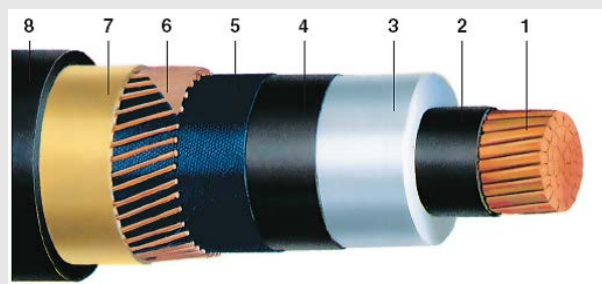
Листові матеріали



Зубчасті колеса



Ізоляція для силових кабелів



Нероз'ємні з'єднання



Резервуари



Резервуари



Плівка для теплиць



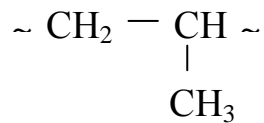
Поліпропілен (ПП)

ПП – термопластичний полімер пропілену.

1. Структура: лінійний термопластичний матеріал зі ступенем кристалічності 50-75%.

2. Спосіб отримання: полімеризації пропілену в присутності каталізатора при тиску $P = 0,5 \dots 1,0$ МПа и температурі $T = 70 - 80$ °С.

3. Хімічна будова:



4. Фізико-механічні характеристики:

Характеристики міцності	міцність при розтязі σ_p , МПа	29 ... 40
	при стиску $\sigma_{ст}$, МПа	38 ... 46
	при згині $\sigma_{зг}$, МПа	42 ... 49
	границя текучості σ_T , МПа	27 ... 35
	максимальна деформація ϵ_{max} , %	200 ... 800
	деформація на межі текучості ϵ_T , %	10 ... 20
Модулі пружності	при розтязі E_p , МПа	1080 ... 1540
	при згині $E_{зг}$, МПа	1050 ... 1900
Ударна в'язкість, твердість	ударна в'язкість $a_{б.н}$, кДж/м ²	не руйнується
	ударна в'язкість a_n , кДж/м ²	5 ... 8
	твердість за Брінелем H_B , МПа	40 ... 70
Температурні характеристики	температура експлуатації T_{max} , °С	65 ... 95
	температура розм'якшення за Віка, °С	140 ... 155
	температура плавлення, °С	160 ... 172
	температура крихкості, °С	-8 ... -15
Інші характеристики	густина ρ , г/см ³	0.90 ... 0.91
	водопоглинання за 24 години, %	0,01 ... 0.09
	деформація литтєвої усадки, %	1.0 ... 2.5

Примітка:

$a_{б.н}$ - ударна в'язкість зразків без надрізу;

a_n - ударна в'язкість зразків з надрізом;

T_{max} - температура, при якій протягом 10 років всі механічні та електричні властивості змінюються не більше, ніж на 50%.

5. Способи переробки і обробки:

- лиття під тиском (200 ... 220⁰С, 35 ... 42 МПа),
- екструзія, пресування, формування з порошку.

6. Переваги і недоліки

Переваги в порівнянні з іншими полімерами	Основні недоліки
<i>висока стійкість до багаторазових перегинів</i>	<i>підвищена крихкість при знижених температурах</i>
<i>висока ударна міцність</i>	<i>низька адгезія до всіх матеріалів (з'єднання - тільки зварювання)</i>
<i>висока хімічна стійкість</i>	<i>висока чутливість до світла і кисню</i>
<i>низьке водопоглинення</i>	
<i>висока поверхнева твердість</i>	<i>висока залежність механічних показників від швидкості прикладання навантаження і від температури</i>
<i>біологічна нешкідливість</i>	

7. Області застосування і види виробів:

Машинобудування	<i>деталі машин захисні корпуси і кожухи</i>
Хімічна промисловість	<i>ємності і труби для агресивних рідин</i>
Будівництво	<i>безнапірні труби і фасонні частини профільні вироби вібро - і шумоізоляції міжповерхових перекриттів</i>
Електропромисловість	<i>електроізоляційні матеріали</i>
Сільське господарство	<i>плівка для теплиць</i>
Торгівля	<i>плівка пакувальна, мішки, тара теплоізоляція для холодильників контейнери предмети побутового призначення волокна</i>

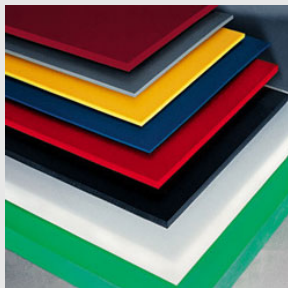
Додаткова інформація

При співполімеризації ПП з етиленом отримують співполімери, що не кристалізуються та проявляють властивості каучуку, що відрізняються підвищеною хімічною стійкістю і опором старінню.

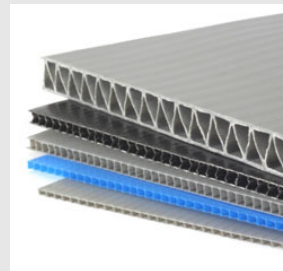
Для вібро - і теплоізоляції також широко застосовується пінополіпропілен (ППП), близький за характеристиками до пінополіетилену. Застосовують декоративні екструзійні профілі з ППП, що замінюють пінополістирол. Атактичний ПП використовують для виготовлення будівельних клеїв, мастик, ущільнювальних мастик, дорожніх покриттів і липких плівок.

Вироби з поліпропілену

Листові матеріали



Комірчасті панелі



Предмети офісів



Пробірки



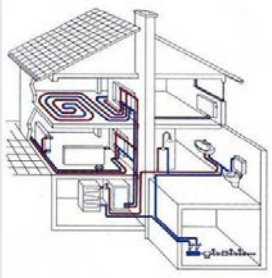
Труби для трубопроводів систем опалювання і водопостачання



Обладнання для хімічної промисловості та гальванічних процесів



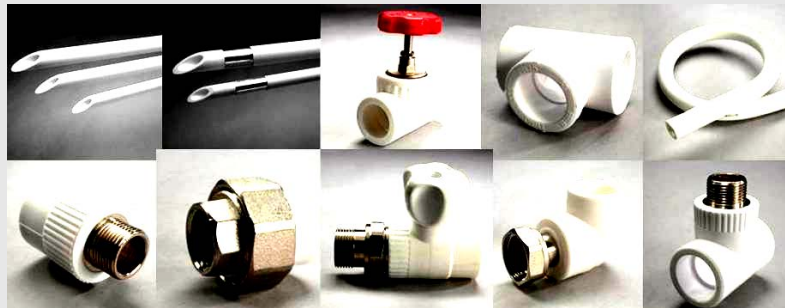
Системи опалення будинків



Фітинги для трубопроводів



Фітинги для трубопроводів



Зварні басейни



Контейнери



1.2.2. ГАЛОГЕНОВМІСНІ ПОЛІМЕРИ

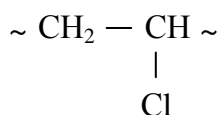
Полівінілхлорид (ПВХ В)

ПВХ – термопластичний полімер вінілхлориду. Клас - карболанцюгові, галогеновмісні.

1. Структура: лінійний термопластичний матеріал зі ступенем кристалічності 0-10%.

2. Спосіб отримання: полімеризація вінілхлориду в присутності каталізатора (в автоклаві при тиску $P=0.4 - 1.2$ МПа і температурі $T=30 \dots 70$ °С). Застосовують ініціатори процесу полімеризації, наприклад, органічні перекиси.

3. Хімічна будова ПВХ:



4. Фізико-механічні характеристики неластифікованого ПВХ:

Характеристики міцності	міцність при розтязі σ_p , МПа	46 ... 53
	при стиску $\sigma_{ст}$, МПа	56 ... 91
	при згині $\sigma_{зг}$, МПа	70 ... 105
	границя текучості σ_T , МПа	41 ... 53
	максимальна деформація ε_{max} , %	5 ... 100
	деформація на межі текучості ε_T , %	5 ... 10
Модулі пружності	при розтязі E_p , МПа	2450 ... 4200
	при згині $E_{зг}$, МПа	2100 ... 3500
Ударна в'язкість, твердість	ударна в'язкість $a_{б.н}$, кДж/м ²	32 ... 80
	ударна в'язкість a_n , кДж/м ²	2
	твердість за Брінелем H_B , МПа	10 ... 160
Температурні характеристики	температура експлуатації T_{max} , °С	50 ... 60
	температура розм'якшення за Віка, °С	40 ... 85
	температура скловання, °С	78 ... 105
	температура текучості, °С	180 ... 220
	температура крихкості, °С	-15
Інші характеристики	густина ρ , г/см ³	1.20 ... 1.55
	водопоглинання за 24 години, %	0.1 ... 0.5
	деформація литтєвої усадки, %	1.0 ... 5.0

Примітка: $a_{б.н}$ - ударна в'язкість зразків без надрізу; a_n - ударна в'язкість зразків з надрізом; $T_{мах}$ - температура, при якій протягом 10 років всі механічні та електричні властивості змінюються не більше, ніж на 50%.

5. Способи переробки і обробки:

- лиття під тиском, екструзія, каландрування,
- вальцювання, зварювання, штампування.

6. Переваги і недоліки

Переваги в порівнянні з іншими полімерами	Основні недоліки
<i>висока міцність</i>	<i>чутливість до температури (збільшується повзучість, знижується міцність)</i>
<i>низька вартість</i>	<i>низька стійкість до світла - усувається введенням фото-стабілізаторів</i>
<i>висока хімічна стійкість</i>	
<i>низьке водопоглинання, висока вологостійкість</i>	<i>низька стійкість до кліматичних впливів - усувається введенням антиоксидантів (феноли, гідрохінони)</i>
<i>біологічна нешкідливість</i>	

7. Области застосування і види виробів з ПВХ:

Машинобудування	<i>вібропоглинаючі матеріали захисні корпуси і кожухи</i>
Транспорт	<i>удароміцні деталі в автомобілебудуванні, залізничному транспорті, авіатранспорті</i>
Хімічна промисловість	<i>ємності і труби для агресивних рідин</i>
Медицина	<i>рукавички, клейонки, сумки, трубки, столи</i>
Будівельна промисловість	<i>деталі вікон, дверей, плінтуси, водостійкі ринви і труби, профільні вироби, облицювання</i>
Електропромисловість	<i>електроізоляційні матеріали</i>
Сільське господарство	<i>захисні плівки</i>
Торгівля	<i>надувні човни, контейнери, штучна шкіра, предмети побутового призначення</i>

Полівінілхлорид в будівництві

Сайдинг – облицювання



Покрівельні матеріали



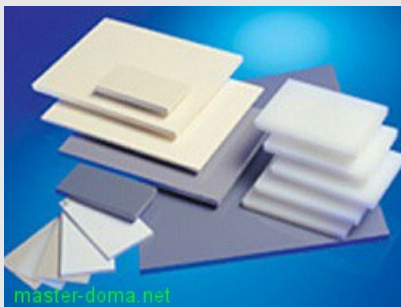
Люки каналізаційні



Панелі



Плитка



Самоклеюча плівка



Профілі

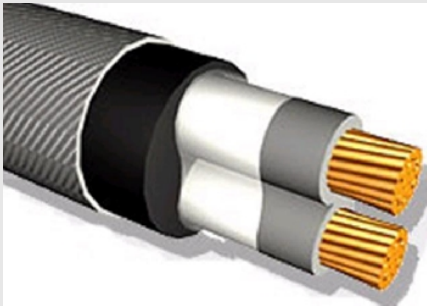


Вікна і двері



Полівінілхлорид в електротехніці і електроніці

Ізоляція кабелів



Захист електропроводки



Корпусу роз'ємів



Ізоляція кабелів

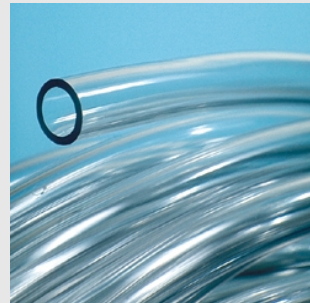


Полівінілхлорид у медицині

Сумка універсальна



Трубки



Захисне взуття



Огородження робочого місця



Політетрафторетилен (ПТФЕ)

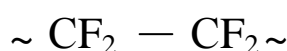
Інші назви - фторопласт, фторопласт-4, тефлон.

Клас – карболанцюгові, галогеномісні.

1. Структура: лінійний термопластичний матеріал зі ступенем кристалічності 90-95%.

2. Спосіб отримання: полімеризація тетрафторетилену при тиску $P = 3,5$ МПа і температурі $T = 80$ °С за присутності каталізаторів.

3. Хімічна будова:



4. Фізико-механічні характеристики ПТФЕ:

Характеристики міцності	міцність при розтязі σ_p , МПа при стиску $\sigma_{ст}$, МПа при згині $\sigma_{зг}$, МПа границя текучості σ_T , МПа максимальна деформація ε_{max} , %	35 ... 50 45 ... 50 40 ... 50 7 ... 45 100 ... 500
Модулі пружності	при розтязі E_p ($T = 20^\circ\text{C}$), МПа при розтязі E_p ($T = -60^\circ\text{C}$), МПа при стиску $E_{ст}$, МПа при згині $E_{зг}$, МПа	980 ... 1580 1300 ... 2800 1185 ... 1470 1370
Ударна в'язкість, твердість	ударна в'язкість $a_{б,н}$, кДж/м ² ударна в'язкість a_n , кДж/м ² твердість за Брінелем H_B , МПа	не руйнується 14 60 ... 80
Температурні характеристики	температура експлуатації T_{max} , °С температура розм'якш. за Віка, °С температура плавлення, °С температура крихкості, °С	-269 ... +260 100 ... 160 327 -190 ... -270
Інші характеристики	густина ρ , г/см ³ водопоглинання за 24 години, % деформація литтєвої усадки, %	2.0 ... 4.0 ≈ 0 3.0 ... 7.0

Примітка: $a_{б,н}$ - ударна в'язкість зразків без надрізу; a_n - ударна в'язкість зразків з надрізом; T_{max} - температура, при якій протягом 10 років всі механічні та електричні властивості змінюються не більше, ніж на 50%.

5. Способи переробки і обробки:

- пресування в металеві форми; лиття під тиском,
- видавлювання у вигляді труб, стрижнів, профільних виробів;
- полив плівки на підкладку; напилення.

6. Переваги і недоліки

Переваги в порівнянні з іншими полімерами	Основні недоліки
<i>з усіх відомих полімерів найбільш хімічно стійкий</i>	<i>відносно мала міцність</i>
<i>не розкладається аж до температури плавлення</i>	<i>складності в переробці</i>
<i>біологічно нешкідливий</i>	
<i>не горить</i>	<i>відносно висока вартість</i>
<i>до 260 °С не розчиняється в жодному розчиннику</i>	
<i>не діють навіть висококонцентровані кислоти і луги</i>	<i>розкладається при радіаційному опроміненні</i>

7. Области застосування і види виробів:

Машинобудування	<i>деталі машин і апаратів; матеріали для підшипників, що працюють без мастила, з обмеженням мастила і при наявності корозійного середовища; пристрої для роботи в корозійних середовищах і при низьких температурах</i>
Автомобільний транспорт	<i>антикорозійні та антиадгезійні покриття</i>
Авіація	<i>антикорозійні та антиадгезійні покриття; гнучкі металопластикові трубопроводи гідросистем, що працюють під високим тиском (понад 20.0 МПа) і з високою температурою робочої рідини</i>
Хімічна промисловість	<i>труби, прокладки, мембрани, вентилі, крани, апарати, ректифікаційні колони, насоси, клапани, сільфони, облицювальні плити, сальникові набивки</i>
Медицина	<i>імпланти для серцево-судинної і загальної хірургії, стоматології, офтальмології; штучні кровоносні судини</i>
Електропромисловість	<i>діелектрик для високочастотного обладнання; плівка для виготовлення високоякісних кабелів, проводів, конденсаторів, для ізоляції котушок, пазів електричних машин</i>
Торгівля	<i>виробництво посуду з антипригарним покриттям</i>

Додаткова інформація.

Фторопласти характеризуються широким діапазоном механічних властивостей, хорошими діелектричними властивостями, високою електричною міцністю, низьким коефіцієнтом тертя, низькими значеннями зносу.

Стійкі до дії різних агресивних середовищ при кімнатній і підвищеній температурах, атмосферо-, корозійно - та радіаційностійкі, слабо газопроникні, не горючі або самі згасають при загорянні. Дуже висока стійкість до нагрівання (до 300 °С).

Композиційні матеріали на основі фторопласту використовуються головним чином для виготовлення деталей підшипників, поршневих кілець, що використовуються в компресорах: прокладок і ущільнювачів в жорстких умовах експлуатації, сідел клапанів, діафрагм вентилів, сальникових кілець та інших виробів, які застосовуються в машинобудуванні, хімічній промисловості та інших галузях.

Ці властивості фторопласту роблять вироби з нього незамінними в хімічній та електротехнічній промисловості, приладобудуванні, машинобудуванні, харчовій, медичній, легкій та швейній промисловості. Фторопласт фізіологічно й біологічно нешкідливий.

Для підвищення твердості, теплопровідності, стійкості до стирання, зниження деформації під навантаженням і коефіцієнта термічного розширення до фторопласту-4 додають різні наповнювачі. Введення наповнювачів до складу фторопласту значно підвищує зносостійкість, твердість, теплопровідність, механічну міцність, знижує відносне видовження при розриві, збільшує модуль пружності та міцність на стиск.

Фторопласт - антифрикційний матеріал з найменшим коефіцієнтом тертя ковзання з відомих доступних конструкційних полімерів. Через м'якість і плинність цілісні підшипники ковзання з фторопласту використовують рідко. У високонавантажених вузлах застосовують металофторопластові підшипники-вкладиші і металофторопластові опорні стрічки. Такий елемент ковзання витримує десятки кілограмів на квадратний міліметр і складається з металевої основи, на яку нанесено фторопластове покриття.

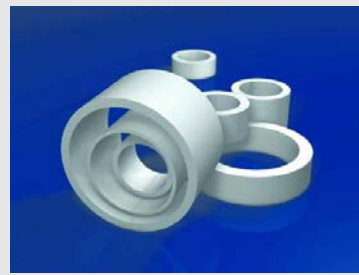
Відомі мастила з введенням до їх складу дрібнодисперсним фторопластом. Їх відрізняє те, що наповнювач, осідаючи на металевих поверхнях тертя, дозволяє в ряді випадків деякий час працювати механізмам без системи змащення, тільки за рахунок антифрикційних властивостей фторопласту.

Політетрафторетилен в промисловості

Антикорозійне покриття



Втулки



Деталі хімічного обладнання



Підшипники ковзання



Фуטרівка для резервуарів



Дозуюче обладнання



Ущільнювальні кільця



Куля для кульового крана



1.2.3. ПОЛІАКРИЛАТИ

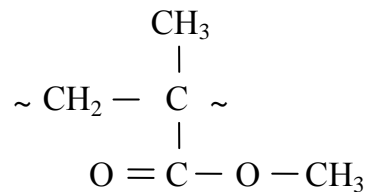
Поліметілметакрилат (ПММА)

Інші назви – оргскло, плексиглас. Клас - поліакрилати.

1. Структура: лінійний термопластичний матеріал, аморфний полімер.

2. Спосіб отримання: полімеризація ефірів акрилової кислоти.

3. Хімічна будова:



4. Фізико-механічні характеристики ПММА:

Характеристики міцності	міцність при розтязі σ_p , МПа при стиску $\sigma_{ст}$, МПа при згині $\sigma_{зг}$, МПа границя текучості σ_T , МПа максимальна деформація ϵ_{max} , %	40 ... 66 70 ... 80 100 ... 140 61 ... 65 2.5 ... 20
Модулі пружності	при розтязі E_p , МПа при стиску E_p , МПа при згині $E_{зг}$, МПа	2660 ... 3290 2660 2660 ... 3010
Ударна в'язкість, твердість	ударна в'язкість $a_{б.н}$, кДж/м ² ударна в'язкість a_n , кДж/м ² твердість за Брінелем H_B , МПа	18 1.4 ... 1.8 130 ... 180
Температурні характеристики	температура експлуатації T_{max} , °С температура розм'якш. за Віка, °С температура скловання, °С температура крихкості, °С	+50 +110 ... +125 +150 ... +170 -60
Інші характеристики	густина ρ , г/см ³ деформація литтєвої усадки, %	1.18 ... 1.20 0.2 ... 0.6

Примітка: $a_{б.н}$ - ударна в'язкість зразків без надрізу; a_n - ударна в'язкість зразків з надрізом; T_{max} - температура, при якій протягом 10 років всі механічні та електричні властивості змінюються не більше, ніж на 50%.

5. Способи переробки і обробки:

- свердління, нарізування різьби, фрезерування;
- обробка за заданим профілем, токарна обробка; обробка різанням,
- шліфування, полірування, вакуумне формування,
- штампування, згинання, склеювання, зварювання,
- фарбування і металізація.

6. Переваги і недоліки

Переваги в порівнянні з іншими полімерами	Основні недоліки
<i>має меншу крихкість у порівнянні зі звичайним склом</i>	<i>має меншу твердість у порівнянні зі звичайним склом</i>
<i>прозорий в листах товщиною до 24 мм</i>	<i>невисока температура експлуатації</i>
<i>висока жорсткість</i>	
<i>хімічна стійкість і стійкість до ультрафіолетових променів</i>	<i>погіршення фізико-механічних характеристик в процесі старіння</i>
<i>екологічно чистий матеріал</i>	<i>не стійкий до розчинників</i>

7. Області застосування і види виробів:

Машинобудування	<i>прозорі захисні корпуси</i>
Транспорт, авіація	<i>скління літаків, катерів, обтічники</i>
Оптика	<i>лінзи, призми</i>
Приладобудування	<i>циферблати, оглядові вікна, корпуси, діелектричні деталі, ємності</i>
Медицина	<i>жорсткі газонепроникні контактні лінзи і жорсткі інтраокулярні лінзи (штучні кришталіки)</i>
Будівництво, електропромисловість, сільське господарство	<i>перегородки, огорожувальні конструкції, куполи, навіси, ліхтарі, сходи, перила; плафони, лицьові екрани, розсіювачі; парники, теплиці, оранжереї</i>
Торгівля	<i>підставки, вітрини, цінники, стільниці, полиці</i>

Додаткова інформація. Оргскло - термопластичний матеріал, тобто він має здатність розм'якшуватися при нагріванні і зберігати при охолодженні ту форму, яку йому надали. Оргскло легко формується, що дозволяє виготовляти з нього об'ємні вироби різного призначення.

Стійкість до хімічних впливів.

На оргскло впливають розбавлені фтористоводневі і ціаністо-жирні кислоти, а також концентровані сірчана, азотна і хромово кислоти.

Розчинниками оргскла є хлоровані вуглеводні (діхлоретан, хлороформ, хлористий метилен), альдегіди, кетони, складні ефіри. На оргскло також впливають спирти: метиловий, бутиловий, етиловий, пропіловий. При нетривалому впливі 10 % етилового спирту взаємодія з оргсклом відсутній.

Залежно від способу виробництва оргскло буває литим і екструзійним. Фізичні властивості литого і екструзійного акрилу незначно відрізняються. Обидва види матеріалу мають достатньо високу стійкість до старіння. Екструзійне оргскло має більш низьку в'язкість при підвищеній температурі. Внаслідок цього при вакуумному формуванні екструзійний акрил дозволяє точніше відтворювати форму. Діапазон температур вакуумної формовки литого оргскла більш широкий. Такий акрил більш удароміцний, краще екструзійно полірується і добре формується. Литий акрил має більш глянцеvu поверхню і кращу оптичну чистоту, ніж екструзійний.

Лите і екструзійне оргскло в більшості випадків взаємозамінні. Однак при виборі матеріалу необхідно враховувати відмінності технічних характеристик, умов і вартості обробки, для виробництва яких видів виробів планується використовувати оргскло.

Обробка матеріалу.

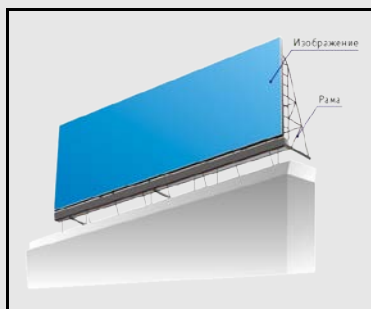
Різання оргскла здійснюється за допомогою стрічкової або портативної електропили, обладнаної спеціальними дрібнозубчастими полотнами для різання по кривій лінії, дисковою пилкою для прямих зрізів, ручною пилкою по металу при проведенні дрібних робіт.

Для ***свердління*** можна використовувати будь-яке металеве гвинтове свердло. При виконанні робіт необхідно постійно видаляти з оброблюваної поверхні стружку, як можна частіше виймаючи свердло з отвору і періодично змочуючи його водою. Для отримання отворів хорошої якості рекомендується застосовувати свердла з карбіду і використовувати змащування.

Склеювання можливе при використанні клеїв на основі розчинників і полімерів.

Оргскло в будівництві

Дахові установки



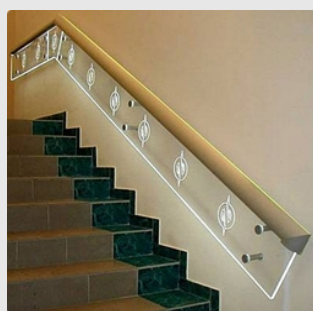
Дахи



Стели, пілони

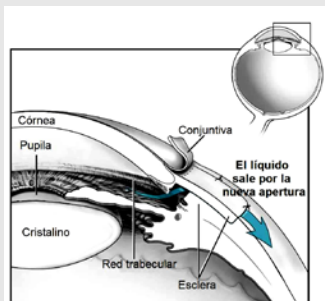


Огородження сходів



Оргскло в медицині

Штучний кришталик



Контактні лінзи



Оргскло в техніці

Резервуар для систем охолодження



Корпуси для приладів



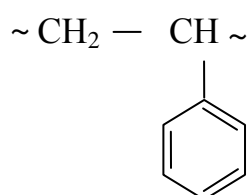
1.2.4. ВІНІЛОВІ ПОЛІМЕРИ З ЦИКЛІЧНИМИ ЗАМІСНИКАМИ

Полістирол (ПС)

1. Структура: аморфний лінійний термопластичний ПМ.

2. Спосіб отримання: радикальна полімеризація стиrolу. Найбільшого поширення набула послідовна термічна полімеризація при температурах 80...100 °С і 100...220 °С в середовищі бензолу. Цим способом отримують блоковий ПС з високою чистотою і стабільністю характеристик.

3. Хімічна будова:



4. Фізико-механічні характеристики ПС:

Характеристики міцності	міцність при розтязі σ_p , МПа	40 ... 46
	при стиску $\sigma_{ст}$, МПа	80 ... 112
	при згині $\sigma_{зг}$, МПа	55 ... 70
	границя текучості σ_T , МПа	38 ... 55
	максимальна деформація ε_{max} , %	1.5 ... 4.0
Модулі пружності	при розтязі E_p , МПа	3080 ... 3500
	при згині $E_{зг}$, МПа	2800 ... 3500
Ударна в'язкість, твердість	ударна в'язкість $a_{б.н}$, кДж/м ²	18 ... 28
	ударна в'язкість a_n , кДж/м ²	1.4 ... 1.6
	твердість за Брінелем H_B , МПа	140 ... 150
Температурні характеристики	температура експлуатації T_{max} , °С	+50
	температура розм'якш. за Віка, °С	+80 ... +105
	температура плавлення, °С	+190 ... +230
	температура крихкості, °С	-60
Інші характеристики	густина ρ , г/см ³	1.04 ... 1.08
	деформація литтєвої усадки, %	0.4 ... 0.8

Примітка: $a_{б.н}$ - ударна в'язкість зразків без надрізу; a_n - ударна в'язкість зразків з надрізом; T_{max} - температура, при якій протягом 10 років всі механічні та електричні властивості змінюються не більше, ніж на 50%.

5. Способи переробки і обробки:

- лиття під тиском,
- екструзія.

6. Переваги і недоліки:

Переваги в порівнянні з іншими полімерами	Основні недоліки
<i>висока стійкість до дії агресивних середовищ</i>	<i>низька міцність</i>
<i>нешкідливий (можна використовувати для упаковки харчової промисловості)</i>	<i>мала теплостійкість (вище 70 °C не застосовують)</i>
	<i>підвищена повзучість навіть при кімнатній температурі</i>

7. Области застосування і види виробів:

Машинобудування	<i>вібропоглинаючі матеріали захисні елементи</i>
Транспорт	<i>декоративні елементи</i>
Медицина	<i>контейнери для донорських органів, допоміжний одноразовий інструмент (поршні для шприців), посуд для стерилізації (чашки Петрі, лотки, підставки), частини систем переливання крові, упаковка для інструментів</i>
Будівельна промисловість	<i>теплоізоляційні плити, декоративні панелі, стельові плити, звукопоглинаючі елементи</i>
Електропромисловість	<i>освітлювальна арматура, панелі приладів</i>
Торгівля	<i>упаковка, в тому числі з пінополістиролу, корпусні елементи побутових приладів, дитячі іграшки</i>

Додаткова інформація.

УПС (ударостійкий полістирол) отримують співполімеризацією стиролу з полібутадієновими або бутадієнстирольними каучуками. Присутність каучуку істотно уповільнює зростання мікротріщин, що підвищує міцність матеріалу.

АБС - пластик є продуктом прищепленої співполімеризації трьох мономерів - *акрилонітрилу, бутадієну і стиролу*, причому статичний

співполімер стиролу і акрилонітрилу утворює тверду матрицю, в якій розподілені частинки каучуку розміром до 1 мкм. Підвищення ударної міцності супроводжується збереженням на високому рівні основних фізико-механічних і теплофізичних властивостей. АБС непрозорий. Застосовується для виготовлення виробів технічного призначення.

Полістирол-бетон. Великорозмірні блоки прискорюють укладання стін і не вимагають використання важкої вантажопідйомної техніки при будівництві будинку (один блок замінює 17 цеглин і важить 20 кг). Застосування *полістирол-бетону* забезпечує високу технологічність у будівництві. *Полістирол-бетонні* блоки мають різноманітну форму, легко монтуються, збільшуючи тим самим швидкість зведення стін в 10 разів і знижуючи витрати праці в 3 рази. *Можливо варіювати густину полістирол-бетону.* Завдяки цьому полістирол бетон з успіхом використовується як теплоізоляційний, так і конструкційний матеріал.

Полістирол-бетону можна надавати складний профіль, що забезпечує герметичність стиків навіть без застосування ущільнюючих матеріалів. Він довговічний (на відміну від полімерних матеріалів, які значно швидше старіють і руйнуються). За своїми характеристиками і споживчими властивостями *полістирол-бетон* дуже близький до дерева, але має значно більшу довговічність.

Міцність *полістирол-бетону* при стисненні до 3,60 МПа). Основний сполучний компонент *полістирол-бетону* - цемент, який з часом набирає найбільшу міцність, тобто в процесі експлуатації *полістирол-бетону* відбувається наростання його міцності. *Полістирол-бетон* – ударов'язкий, пластичний і тріщиностійкий матеріал. Навіть при дуже великих навантаженнях *полістирол-бетон* тільки деформується (мнеться, гнеться, продавлюється), але не розколюється і не руйнується. Завдяки підвищеній міцності, в сейсмонебезпечних регіонах *полістирол-бетон* – основний будівельний матеріал (сейсмостійкість будівель з *полістирол-бетону* - до 9 балів за шкалою Ріхтера).

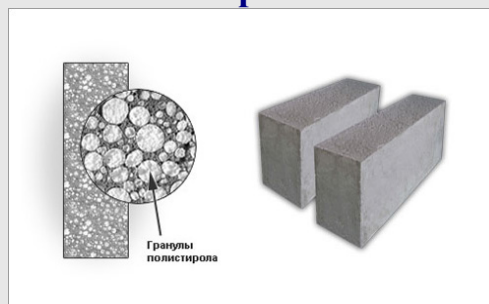
За зміни вологості *полістирол-бетон* не деформується. Волога не впливає на теплоізоляційні властивості *полістирол-бетону* і не викликає утворення в ньому бактерій і цвілі. *Полістирол-бетон* - теплоізоляційний матеріал. На сьогоднішній день - це самий теплий будівельний продукт за теплопровідністю (перевершує навіть дерево). Ця унікальна властивість дозволяє досягати значної економії будівельних матеріалів за рахунок меншої товщини стін. Блок товщиною 30 см замінює близько 2-х метрів цегляної кладки.

Полістирол у будівництві

Пінополістирольні панелі та блоки



Полістирол-бетон



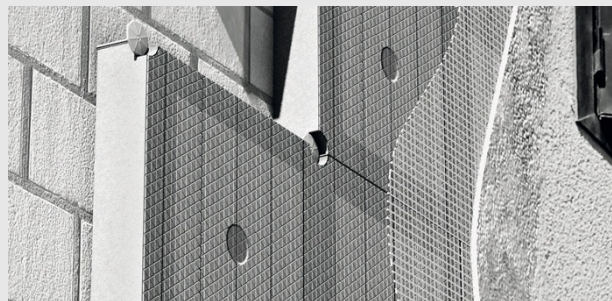
Полістирол-бетонні блоки



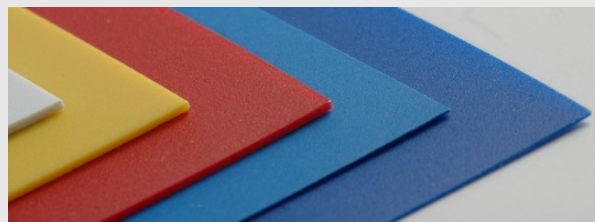
Теплоізоляція



Фасадні системи

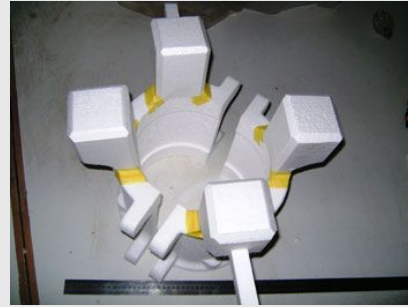
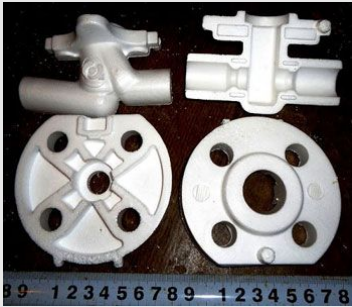


Листові матеріали з полістиролу



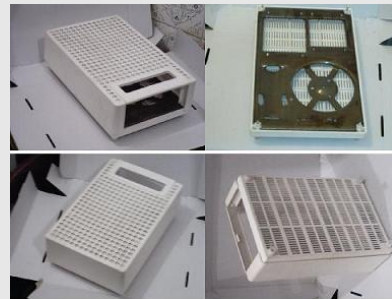
Полістирол в машинобудуванні

Захист деталей складної форми при транспортуванні



Полістирол в електротехніці

Корпуси виробів



Полістирол в медицині

Одноразовий інструмент



Чашки Петрі



Валіза екстреної допомоги



Одноразові пробірки



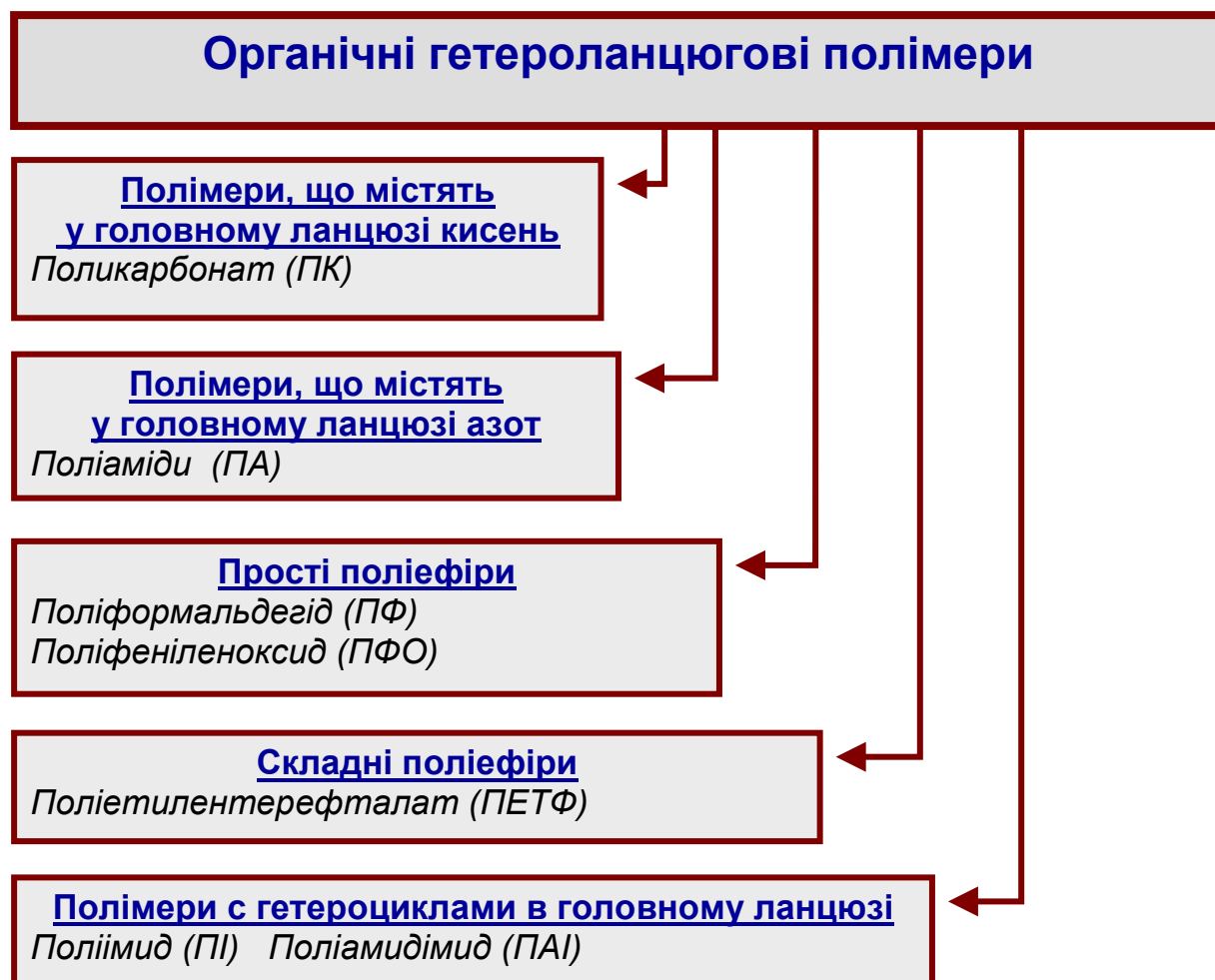
1.2.5. ОРГАНІЧНІ ГЕТЕРОЛАНЦЮГОВІ ПОЛІМЕРИ

Гетероланцюгові полімери - це полімери, макромолекули яких містять в головному ланцюзі різнорідні атоми.

Крім вуглецю, водню і кисню до складу гетероланцюгових полімерів можуть входити азот, кремній, фосфор і інші хімічні елементи.

Найбільш поширеними гетероланцюговими полімерами в даний час є поліефіри, поліаміди та деякі види смол.

Наявність у складі головного ланцюга макромолекул додаткових хімічних елементів впливає на різні властивості сполук, що може бути необхідним при застосуванні полімерних матеріалів в якості конструкційних пластмас.



Органічні гетероланцюгові полімери с киснем в головному ланцюзі.

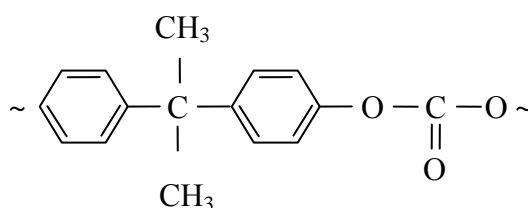
Полікарбонат (ПК)

Інша назва ПК - дифлон.

1. Структура: лінійний, термопластичний (розгалужений або тривимірний), ступінь кристалізації 10-40%.

2. Спосіб отримання – міжфазна поліконденсація бісфенолу А з фосгеном у середовищі водного лугу і органічного розчинника.

3. Хімічна будова:



4. Фізико-механічні характеристики ПК:

Характеристики міцності	міцність при розтязі σ_p , МПа	50 ... 70
	при стиску $\sigma_{ст}$, МПа	75 ... 85
	при згині $\sigma_{зг}$, МПа	85 ... 100
	границя текучості σ_T , МПа	55
	максимальна деформація ϵ_{max} , %	2.5 ... 80
Модулі пружності	при розтязі E_p , МПа	2200 ... 2300
	при згині $E_{зг}$, МПа	2400 ... 2500
Ударна в'язкість, твердість	ударна в'язкість $a_{б.н}$, кДж/м ²	не руйнується
	ударна в'язкість a_n , кДж/м ²	25 ... 50
	твердість за Брінелем H_B , МПа	103 ... 110
Температурні характеристики	температура експлуатації T_{max} , °С	+95 ... +115
	температура розм'якш. за Віка, °С	+148 ... +153
	температура плавлення, °С	+220 ... +270
	температура крихкості, °С	-130
Інші характеристики	густина ρ , г/см ³	1.19 ... 1.20
	деформація литтєвої усадки, %	0.5 ... 0.8

Примітка: $a_{б.н}$ - ударна в'язкість зразків без надрізу; a_n - ударна в'язкість зразків з надрізом; T_{max} - температура, при якій протягом 10 років всі механічні та електричні властивості змінюються не більше, ніж на 50%.

5. Способи переробки і обробки:

- екструзії або лиття під тиском; точіння, свердління, фрезерування; можливо виготовлення тонких плівок.

6. Переваги і недоліки:

Переваги в порівнянні з іншими полімерами	Основні недоліки
<i>висока міцність і ударна в'язкість</i>	<i>низька термостабільність при температурах вище 150 °С</i>
<i>висока теплостійкість, морозостійкість</i>	
<i>низьке водопоглинення</i>	
<i>стійкість до ультрафіолетових променів</i>	
<i>стійкість до біологічних середовищ</i>	
<i>низька усадка</i>	

7. Области застосування і види виробів:

Машинобудування	<i>прецизійні деталі (шестерні, втулки тощо); інструмент; захисні огороження, захисні пристосування (кожухи) для переробних верстатів та обладнання</i>
Транспорт	<i>захисне обладнання (каска, шоломи)</i>
Хімічна промисловість	<i>резервуари</i>
Медицина	<i>медична техніка (чашки Петрі, фільтри для крові, різні хірургічні інструменти), лінзи для очей, протези</i>
Будівельна промисловість	<i>світлопрозорі покрівлі, аочні перекриття, козирки, навіси, автобусні зупинки, захисні шумоізоляційні екрани і стіни; паркування, велосипедні стоянки, пішохідні галереї; листи для скління будівель і спортивних споруд, теплиць, для виробництва високоміцного багатощарового скла - триплексу</i>
Електропромисловість	<i>освітлювальна арматура, електрообладнання; деталі ЕОМ, компакт-диски; деталі електронних апаратів і телевізорів, каркаси для котушок, корпуси і кришки батарей, телефонні апарати, корпуси електроінструментів, мобільних телефонів, апаратура для телезв'язку та ін.</i>
Торгівля	<i>декоративне оформлення інтер'єрів і вітрин; виготовлення посуду, упаковки і меблів</i>

Полікарбонат в будівництві

Навіси



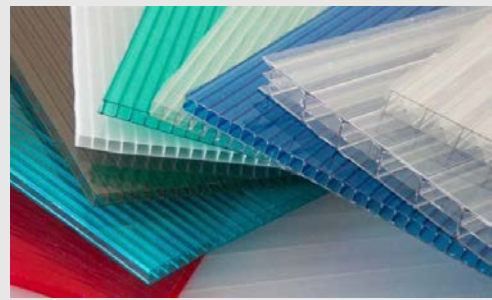
Теплиці



Профілі



Стільникові матеріали



Полікарбонат в авіації та транспорті

**Купол кабіни пілота літака
F-22 Raptor**



Диски для коліс



Вироби різні

Диски CD-R



Захисні шоломи



Полікарбонат в медицині

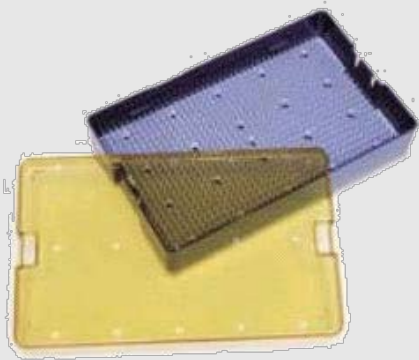
Пристрій для перекачування крові



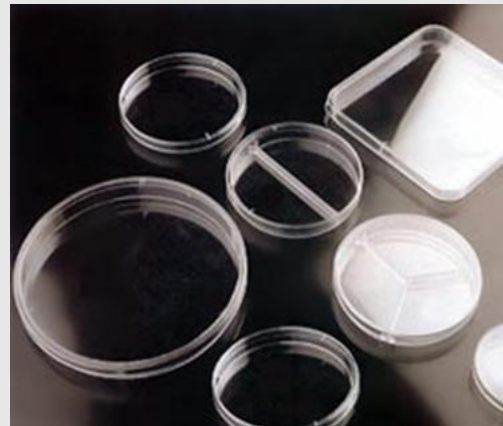
Пристрої для ін'єкції ліків без використання голки



Піднос для стерилізації хірургічних інструментів



Чашки Петрі



Інструменти одноразового використання



Органічні гетероланцюгові полімери з азотом в головному ланцюзі

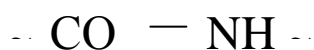
Поліамід (ПА)

Інша назва ПА - капрон.

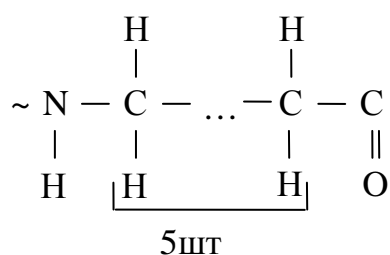
1. Структура: лінійний, термопластичний, ступінь кристалізації 40-70%.

2. Спосіб отримання – поліконденсація амідів кислот з альдегідами; поліконденсація амінокислот та ін.

3. Хімічна будова: містить в головному ланцюзі макромолекули амідних груп



Наприклад капрон:



CH_2 – метиленова група.

Серед марок ПА, що випускаються промисловістю, найбільш відомі:

Поліамід-6 $([-\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}-]_n)$

Поліамід-12 $([-\text{HN}-(\text{CH}_2)_{11}-\text{CO}-]_n)$

Поліамід-66 $([-\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}-]_n)$

Поліамід-610 $([-\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_8-\text{CO}-]_n)$

4. Способи переробки і обробки:

- лиття під тиском, екструзія, точіння, фрезерування, шліфування,
- свердління, інші способи обробки.

5. Фізико-механічні характеристики ПА:

Характеристики міцності	міцність при розтязі σ_p , МПа при стиску $\sigma_{ст}$, МПа при згині $\sigma_{зг}$, МПа границя текучості σ_T , МПа максимальна деформація ε_{max} , %	50 ... 75 45 ... 50 45 ... 55 40 ... 60 100 ... 150
Модулі пружності	при розтязі E_p , МПа при згині $E_{зг}$, МПа	950 ... 1700 800 ... 1370
Ударна в'язкість, твердість	ударна в'язкість $a_{б.н}$, кДж/м ² ударна в'язкість a_n , кДж/м ² твердість за Брінелем H_B , МПа	не руйнується 14 ... 20 70 ... 84
Температурні характеристики	температура експлуатації T_{max} , °С температура розм'якш. за Віка, °С температура плавлення, °С температура крихкості, °С	+70 ... +75 +205 ... +215 +220 ... +430 -60
Інші характеристики	густина ρ , г/см ³ деформація литвєвої усадки, %	1.12 ... 1.16 0.6 ... 2.5

6. Переваги і недоліки:

Переваги в порівнянні з іншими полімерами	Основні недоліки
<i>висока механічна міцність, жорсткість, твердість і пружність; висока втомна міцність</i>	<i>не стійкий до кислот</i>
<i>низький коефіцієнт тертя, стійкість до стирання, абразивостійкість</i>	
<i>висока демпфуюча здатність</i>	
<i>стійкий до багатьох масел, жирів, дизельного і бензинового палива, лугів, висока стійкість до випромінювання (гамма - та рентгенівські промені)</i>	<i>чутливий до вологості повітря</i>

7. Области застосування і види виробів:

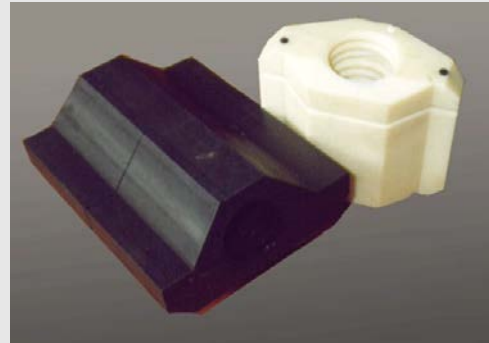
Машинобудування, транспорт, авіація	<i>різні деталі машин: підшипники ковзання і корпуси підшипників; втулки, шківни, ролики, шестірні, блоки; зносостійкі зубчасті передачі; вкладиші, пари тертя і кулачки</i>
Медицина	<i>для виготовлення протезів, хірургічних ниток, штучних кровоносних судин</i>
Будівництво, видобувна та електропромисловість	<i>антикорозійний матеріал для захисту металів та бетону, деталі механізмів для роботи в середовищі з підвищеним рівнем вологості, електроізоляційний матеріал</i>
Виробництво зброї	<i>магазини та приклади сучасних автоматів</i>
Торгівля	<i>волокна; плівки, що припустимі для контакту з харчовими продуктами</i>

Деталі машин з поліаміду

Вкладиші



Втулки і вкладиші



Ролики самозмазщувані



Шків



Сегменти зубчастих коліс



Зубчасті колеса



Зубчасті колеса



Зубчасті колеса



Поліаміди в автомобільному транспорті

Деталі автомобілів



Трубопроводи паливних систем



Інші вироби

Деталі травматичної зброї



Корпуси інструментів



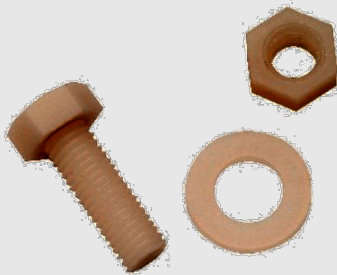
Канати



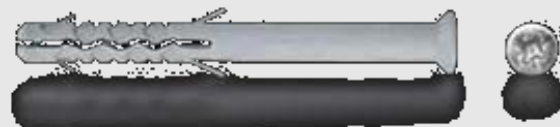
Гофровані труби



Кріплення



Дюбелі кріпильні



1.3. ПОЛІМЕРИ З ВИСОКИМИ МЕХАНІЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ ТА ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Для використання в якості конструкційних матеріалів можна рекомендувати такі марки пластмас (розташовані в таблицях за зростанням характеристики).

1.3.1. ПЛАСТМАСИ З ПІДВИЩЕНИМИ МІЦНІСТЮ, МОДУЛЕМ ПРУЖНОСТІ, ТВЕРДІСТЮ ТА УДАРНОЮ В'ЯЗКІСТЮ

Пластмаси з підвищеною міцністю за ГОСТ 11262 - 80

Діапазони значень границі міцності	Матеріали та модифікації
$\sigma_p = (60 \dots 80)$ МПа	<i>ПФО, ПА-6, ПА-610, ПК, ПММА</i>
$\sigma_p = (80 \dots 100)$ МПа	<i>епоксидні смоли; ПЕТФ</i>
$\sigma_p = (100 \dots 140)$ МПа	<i>ПІ, ФН</i>
σ_p більше 140 МПа	<i>ПА, ПЕТФ, ПІ та ПАІ, наповнені скловолоконом</i>

Пластмаси з високим модулем пружності за ГОСТ 9550 - 81

Діапазони значень модуля пружності	Матеріали та модифікації
$E = (2000 \dots 3000)$ МПа	<i>епоксидні смоли; ПС, ПФО, ПК</i>
$E = (3000 \dots 4000)$ МПа	<i>ПВХ «В», ПММА</i>
$E = (4000 \dots 5000)$ МПа	<i>ПАІ, ФН, ПІ</i>
E більше 5000 МПа	<i>ПА, ПЕТФ, ПІ та ПАІ, наповнені скловолоконом</i>

Пластмаси з підвищеною твердістю за ГОСТ 4670-77

Діапазони значень твердості НК	Матеріали та модифікації
$H_B = (100 \dots 120)$ МПа	<i>ПК, ПФО</i>
$H_B = (120 \dots 140)$ МПа	<i>ПММА</i>
$H_B = (140 \dots 160)$ МПа	<i>ПС, ПФ, ПЕТФ</i>
H_B більше 160 МПа	<i>ФН, ПІ, ПАІ; ПА, ПЕТФ, наповнені скловолоконом</i>

H_B – відношення навантаження до поверхні сферичного відбитка сталевий кульки, МПа

Пластмаси з підвищеною ударною в'язкістю за Шарпі (ГОСТ 4647-80)

Діапазони значень ударної в'язкості a_H	Матеріали та модифікації
$a_H = (20 \dots 30)$ МПа	ПК
$a_H = (30 \dots 50)$ МПа	ПФО, ПК-УП, ПВХ
a_H більше 50 МПа	ПА-12УП, ПА-6УП, ПА-12Е
не руйнуються	ПЕНП, ПЕВП, ПА-УП, ПА-6Е

Ударна в'язкість a_H – це енергія молота маятнікового копра, витрачена на руйнування зразка, віднесена до площі поперечного перерізу зразка, кДж/м²

1.3.2. ПЛАСТМАСИ З ПІДВИЩЕНИМИ ТЕПЛОСТІЙКІСТЮ, НАГРІВОСТІЙКІСТЮ ТА НИЗЬКИМИ ТЕМПЕРАТУРАМИ КРИХКОСТІ

Пластмаси з підвищеною теплостійкістю (T °С за Віка)

Діапазони значень температури T_B	Матеріали та модифікації
$T_B = (100 \dots 120)$ °С	ПЕВД, ПММА
$T_B = (120 \dots 140)$ °С	ПЕНД
$T_B = (140 \dots 160)$ °С	ПП, ПК
$T_B = (160 \dots 180)$ °С	ПФО, ПФ
більше 180 °С	ПА-6, ФН, ПЭТФ, ПІ, ПАІ

Температура розм'якшення за Віка T_B - це температура, за якої індентор під дією навантаження проникає на глибину 1 мм, °С

Пластмаси з підвищеною нагрівостійкістю (°С)

Діапазони значень температури T_{MAX}	Матеріали та модифікації
$T_{MAX} = (60 \dots 80)$ °С	ПП, ПА-6, ПА-610
$T_{MAX} = (80 \dots 100)$ °С	ПП-НС, ПФО, ПФ
T_{MAX} більше 100 °С	ПК, ПА-6

Нагрівостійкість T_{MAX} - максимальна температура, за якої матеріал здатний протягом 10 років змінювати свої механічні властивості не більше, ніж на 50%

Пластмаси з низькими температурами крихкості (ГОСТ 16782-83)

Діапазони значень температури $T_{кр}$	Матеріали та модифікації
$T_{кр} = (-40 \dots -60) ^\circ\text{C}$	<i>ПА-6</i>
$T_{кр} = (-60 \dots -80) ^\circ\text{C}$	<i>ПММА, ПС, ПЕТФ</i>
$T_{кр} = (-80 \dots -100) ^\circ\text{C}$	<i>ФН, ПФО, ПФ</i>
$T_{кр}$ нижче $-100 ^\circ\text{C}$	<i>ПЕВД, ПЕНД, ПТФЕ, ПК, ПІ</i>

Температура крихкості $T_{кр}$ - визначається як температура, за якої зразок матеріалу руйнується крихко, тобто без помітних пластичних деформацій

1.3.3. ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З ПОЛІМЕРНОЮ МАТРИЦЕЮ

Склопластики - найширше вживані композиційні матеріали, армовані скловолокном.

До їх переваг відносяться (дані для склопластиків на основі епоксидних смол):

- відносно невелика густина ($1.6 \dots 2.0 \text{ г / см}^3$);
- висока міцність (при розтязі $\sigma_p^+ = 410 \dots 1180 \text{ МПа}$,
при згині $\sigma_{зг} = 690 \dots 1240 \text{ МПа}$);
- високий модуль пружності (при розтязі $E = 21 \dots 41 \text{ ГПа}$);
- висока стійкість до знакозмінних напружень;
- висока стійкість до теплових ударів;
- висока корозійна стійкість;
- легка оброблюваність.

Однонапрявлені *склопластики на основі епоксидних смол* мають ще вищі механічні показники:

- міцність при розтязі $\sigma_p^+ = 1600 \dots 2100 \text{ МПа}$;
- модуль пружності при розтязі $E = 60 \dots 70 \text{ ГПа}$.

Шаруваті склопластики на основі тканин називаються **склотекстолітами**. Для виготовлення склотекстолітів в якості зв'язуючого використовують термореактивні смоли (поліефірні, епоксидні, фенолформальдегідні).

Вуглепластики - композиційні матеріали на основі високоміцних вуглецевих волокон:

- висока міцність ($\sigma_p^+ = 780 \dots 1800$ МПа);
- висока термостійкість (довготривала експлуатація при температурах до 300°C);
- підвищена жорсткість (модуль пружності $E = 120 \dots 130$ ГПа);
- низький температурний коефіцієнт лінійного розширення (α_T у 15 ... 20 разів нижчий ніж у металів та у 50 ... 100 разів нижчий, ніж у неармованих полімерів);

В якості матриці для вуглепластиків застосовуються епоксидні, епоксифенольні, поліімідні та інші смоли.

Боропластики - композиційні матеріали з волокнами бору:

- висока міцність (при розтязі $\sigma_p = 1200 \dots 1300$ МПа,
при згині $\sigma_{зг} = 1550 \dots 1750$ МПа
при стиску $\sigma_c = 1160 \dots 1250$ МПа);
- гранична температура експлуатації $200 \dots 300^\circ\text{C}$.

В якості матриці для боропластиків застосовуються переважно епоксидні, та поліімідні смоли.

Органопластики - найчастіше виготовляють на основі арамідних волокон (ароматичний поліамід):

- висока міцність (при розтязі $\sigma_p^+ = 1500 \dots 2500$ МПа,
при згині $\sigma_{зг} = 500 \dots 700$ МПа
при стиску $\sigma_c = 200 \dots 300$ МПа);
- підвищена жорсткість (модуль пружності $E = 50 \dots 90$ ГПа);

- високі граничні температури експлуатації (короткочасна дія температури 400 ... 500⁰С, тривала дія до 250⁰С);
- висока ударна в'язкість (до 315 кДж / м²);
- висока хімічна стійкість.

Як матрицю для органопластиків застосовують переважно епоксидні смоли.

Гібридні армовані пластики. Як приклад розглянемо вуглець - вуглецеві композиційні матеріали.

Види структури: хаотична, шарувата або орієнтована в 3-х, 4-х і 5-и напрямках.

Арматуру отримують з полімерних волокон, піддають сушінню і термообробці при 1100 ... 1300К.

Матрицю отримують карбонізацією полімерної матриці шляхом високотемпературної термообробки в неокислювальному середовищі (чадний газ або вугільна засипка) в ретортних печах.

Вихідні матриці - фенолформальдегідні або епоксидні смоли, а також кремнійорганічні полімери.

Механічні властивості гібридних армованих пластиків:

- міцність при згині $\sigma_{зг} = 110 \dots 130$ МПа (при температурі 20⁰С),
 $\sigma_{зг} = 80 \dots 90$ МПа (при температурі 550 ...600⁰С);

- модуль пружності $E = 13 \dots 15$ ГПа (при температурі 20⁰С),
 $E = 9 \dots 13$ ГПа (при температурі 550 ...600⁰С)

Основна перевага цих пластиків - підвищена термостійкість.

1.3.4. ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАСТМАС

Вироби	Матеріали
зубчасті передачі , не вимагають мастила; зубчаті колеса	ПЕ НД, ПА, ПП ПМ на основі фенольних смол
підшипники ковзання	ПТФЕ, ПМ на основі фенольних смол
антифрикційні вироби, що застосовуються у вузлах з ускладненим змащуванням	ПА
вкладиші радіальних підшипників	ПТФЕ
термостійкі підшипники ковзання	ПП
кришки підшипників	ПЕ НД
втулки	ПЕ НД
корпуси насосів	ПП
корпуси радіо та електротехнічної апаратури, приладів	ПС
деталі насосів	ПТФЕ
муфти	ПА
ущільнювачі і ущільнювальні кільця	ПА, ПП
поршневі кільця	ПТФЕ
кришки коробок передач	ПП
паливні баки; тара для зберігання та транспортування кислот і лугів	ПЕ НД
труби і фланги гайок для з'єднання труб; труби з підвищеною питомою міцністю; деталі трубопроводів	ПЕ ВД, ПП, ПТФЕ
антикорозійні покриття трубопроводів і систем	ПТФЕ
листи та плити для футерування апаратів і резервуарів	ПЕ ВД

деталі автомобілів; клапани	ПП
вироби з підвищеною питомою міцністю (машино- та приладобудування, будівництво)	ПВХ
вібропоглинальні елементи	ПВХ
вироби складної конфігурації	ПС
покриття різного призначення: - хімічно стійкі, зносостійкі, атмосферостійкі, - стійкі до радіаційного опромінення, - стійкі до ультрафіолетового опромінення, - антиадгезійні	ПТФЭ
захисні покриття металів; покриття в суднобудуванні та будівництві	Кремнійорганічні ПМ
вироби для роботи в тропіках	ПТФЕ
лопаті гвинтів, стійкі до дії агресивних середовищ	ПА
машинобудівні вироби - замітники кольорових металів	ПА
деталі авіаційних конструкцій; високоміцні гальмівні колодки; деталі, стійкі до тропічного клімату	ПМ на основі фенольних смол
для виготовлення високоміцних конструкційних матеріалів (склопластики)	Епоксидні смоли
будівельні матеріали; теплоізоляція, звукоізоляція	Пінопласти (ПЕ, ПВХ, ПС)
деталі і вироби, що працюють при підвищених навантаженнях і температурах	Склопластики

Розподіл матеріалів за областями застосування:

- *конструкційні матеріали: ПП, ПВХ, ПС, ПТФЕ, ПА, ПК, ПЕТФ, ПІ, склопластики;*

- *антифрикційні матеріали: ПТФЕ (фторопласт), ПА, ПК, ПІ, склопластики;*

- *для застосування в умовах тропічного клімату: ПЕВТ, ПП, ПС;*

- *вібростійкі матеріали: ПВХ, ПТФЕ, епоксидні смоли;*

- радіаційностійкі матеріали: ПТФЕ, ПІ.

РОЗДІЛ 2. ДЕФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРІВ ПРИ КОРОТКОЧАСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

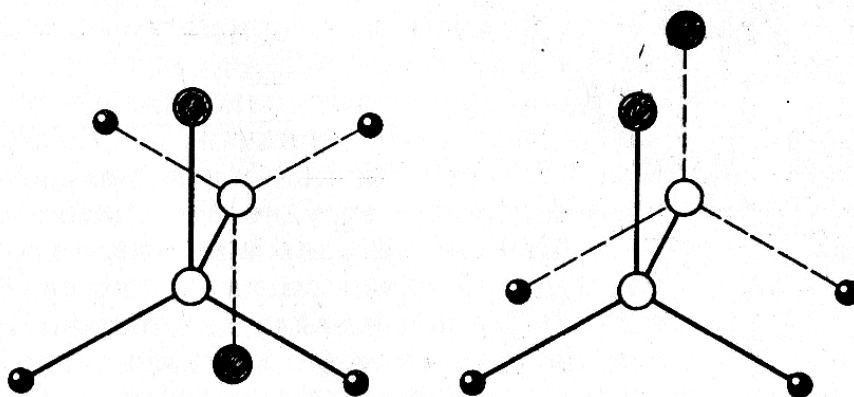
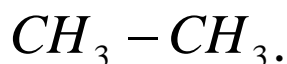
Крім пружних деформацій, під дією навантаження виникають інші види деформацій: високоеластична, в'язка, пластична та ін. види.

Для з'ясування механізмів виникнення цих видів деформації необхідно ознайомитися зі структурою полімеру.

2.1. СТРУКТУРА АМОРФНИХ ПОЛІМЕРІВ

Макромолекули мають велику довжину. Тому виникає поворотна ізомерія, що виражається в різних конформаціях (конформація - просторове розташування атомів змінюється під дією теплових рухів).

Приклад – етан



Транс – ізомерія
(найбільш вигідне положення)

Цис – ізомерія
(найменш вигідне положення)

Рис. 2.1 – Різні положення атомів Н відносно зв'язку С – С [1]

Навколо зв'язку С – С відбуваються коливання метильних груп з частотою $\nu = 10^{10}$ Гц. При цьому вони займають різні положення.

При переході через цис-ізомерію необхідно витратити енергію, тобто подолати **потенційний бар'єр обертання** (для етилу – 11,5 кДж/моль).

Подолати цей бар'єр допомагає наявність флуктуації теплової енергії.

Флуктуація - випадкове відхилення якої-небудь фізичної величини від її середнього значення.

Чим вищий потенційний бар'єр обертання, тим більш ускладненим буде обертання.

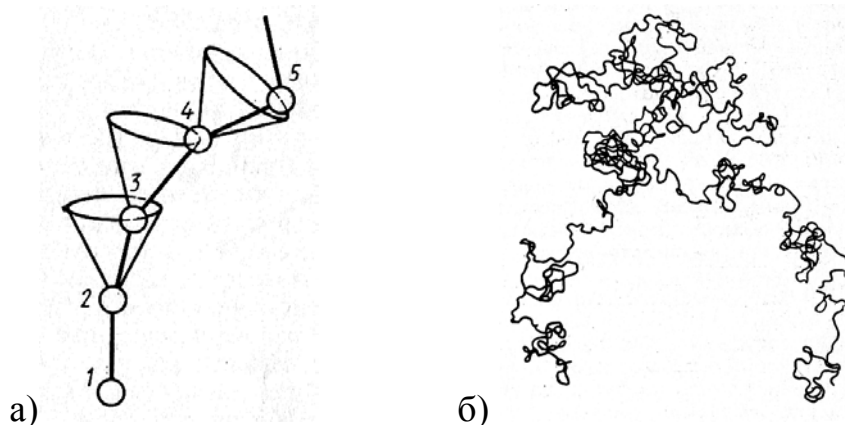


Рис. 2.2 – Просторове розташування ділянки макромолекули при наявності валентного кута між зв'язками С – С (а) та модель молекули поліетилену (б) [1]

Кожен зі зв'язків С - С має валентний кут (кут нахилу одного зв'язку по відношенню до іншого). Зв'язок 2 - 3 розташовується в межах конуса, утвореного валентним кутом. Таким чином, макромолекула розташована в просторі не як стрижень, а як гнучкий ланцюг.

Макромолекула має гнучкість.

Статистично найбільш ймовірні утворення макромолекул у вигляді клубків. Макромолекула займає всього 1 - 3 % загального обсягу клубка.

2.1.1. ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОВОГО РУХУ МАКРОМОЛЕКУЛ

Оскільки атоми пов'язані в ланцюг, механічний імпульс, що виникає за рахунок теплових флуктуацій, переміщує не окремі ланки, а угруповання (сегменти).

Сегмент – відрізок ланцюга, що переміщується як єдине ціле в елементарному акті теплового руху.

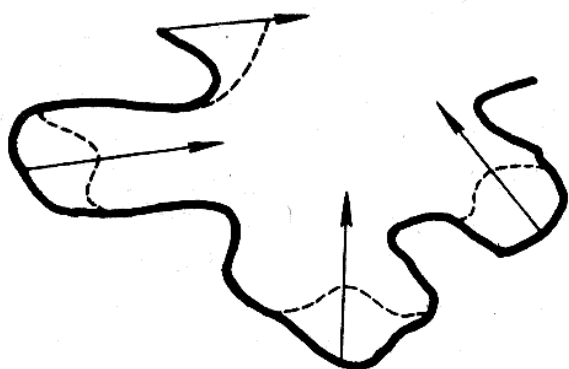


Рис. 2.3 – Переміщення сегментів макромолекули під дією імпульсів теплового руху [Кулезнев]

Сегмент - поняття умовне, середньостатистичне. При взаємному переплетенні окремих клубків виникають мікрооб'єми з упорядкованим розташуванням сегментів. Окремі сегменти створюють так звану надмолекулярну структуру з наявністю впорядкованих мікрооб'ємів. Одна і та ж макромолекула проходить кілька упорядкованих мікрооб'ємів.

Асоціація – впорядкований мікрооб'єм, що складається з декількох (5 - 10) сегментів.

2.1.2. ПОНЯТТЯ ПРО ФЛУКТУАЦІЙНУ СІТКУ

Сукупність асоціацій утворює просторову (флуктуаційну) сітку. Вузли цієї сітки виникають в одному місці і розпадаються в іншому.

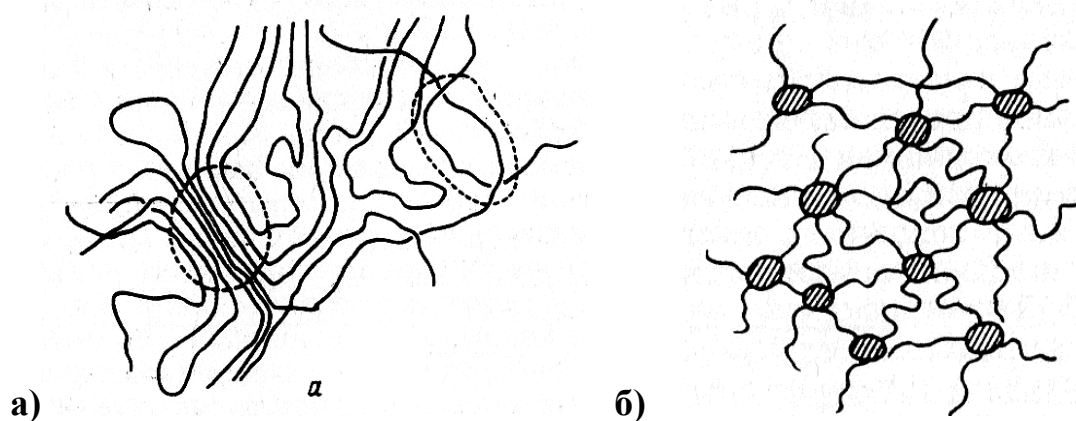


Рис. 2.4 – Схематичне зображення флуктуаційної сітки: асоціат з паралельною укладкою сегментів (а), сітка з прохідними макромолекулами (б) [1]

Флуктуаційна сітка (ФС) - це сукупність асоціацій, сполучених ділянками макромолекул.

Наявність флуктуаційної сітки обумовлює особливість полімерів – в'язко-еластичність (в'язко-пружність) - поєднання двох видів деформацій: пружної і в'язкої.

I) Короткочасна дія навантаження:

клубки витягуються і після зняття навантаження повертаються в початковий стан. Флуктуаційна сітка не розпадається, виникає пружна деформація.

II) Тривала дія навантаження:

відбувається розпад вузлів флуктуаційної сітки і переміщення сегментів (ковзання). Виникає в'язка деформація протягом часу (незворотне).

Зазвичай ці два процеси збігаються і виникає в'язко пружна деформація.

2.2. ЗАЛЕЖНІСТЬ ДЕФОРМАЦІЇ ПОЛІМЕРІВ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

При малих температурах бар'єр обертання неможливо подолати, макромолекула не може згинатися.

Полімер веде себе як скло, тобто знаходиться в склоподібному стані.

2.2.2. ТЕРМОМЕХАНІЧНА КРИВА АМОРФНОГО ПОЛІМЕРУ

Шляхом вимірювання деформації зразка аморфного полімеру при різних температурах можна побудувати залежність деформації від температури (термомеханічну криву, **рис. 2.5**. На цій кривій виділяють чотири області.

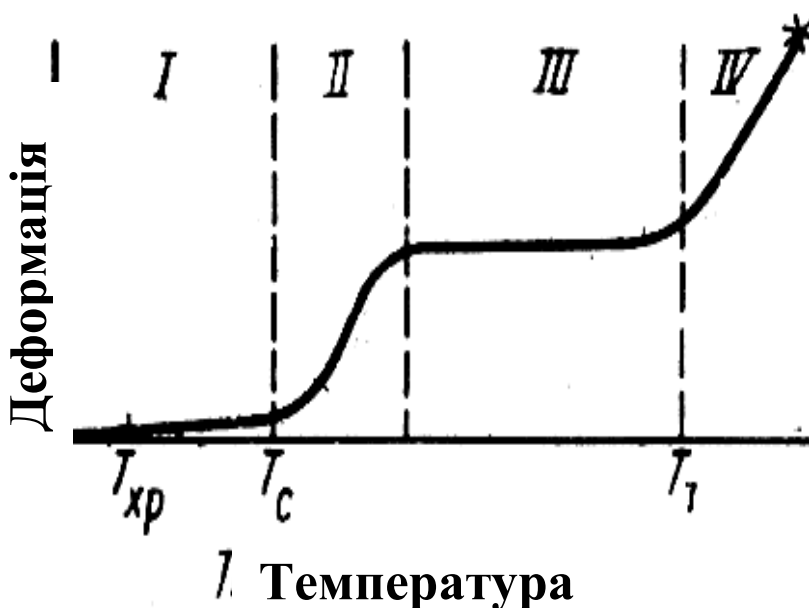


Рис. 2.5 – Термомеханічна крива аморфного полімеру: I – область склоподібного стану; II – перехідна область; III – область високоеластичного стану; IV – область в'язко-текучого стану; $T_{кр}$ – температура крихкості, T_c – температура склування, T_t – температура текучості; зірочкою відмічена точка початку деструкції

Область I – сегменти не переміщуються, макромолекули не змінюють форму клубків.

Область II – перехідна, що характеризується температурою склування (T_c). Деформація збільшується і досягає декількох десятків або декількох сотень відсотків.

Область III – розвинений високо-еластичний (ВЕ) стан. Полімер легко деформується і повертається у вихідний стан. Сегменти переміщуються, вузли флуктуаційної сітки руйнуються. Утворюються нові вузли флуктуаційної сітки.

Область IV – значне зміщення сегментів. Вони не можуть перейти у вихідне положення. Це деформація в'язкої течії.

Нижче $T_{кр}$ - крихкий стан, полімер легко руйнується при ударі.

На **рис. 2.6** показані температурні границі різних станів аморфних полімерів.

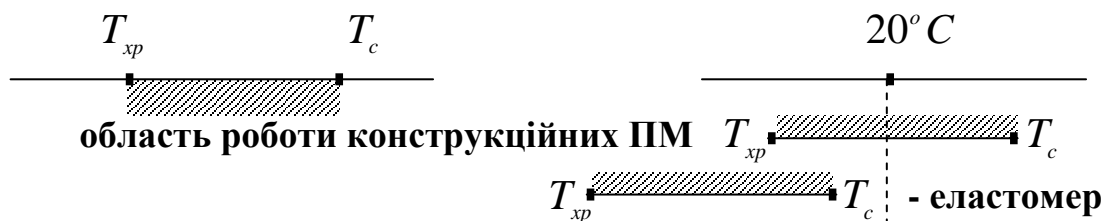


Рис. 2.6 – Температурні області різних станів полімерів

В залежності від величини температури склування, полімери розділяються на еластомери та конструкційні (жорсткі) полімери.

**Якщо $T_c < 20^\circ C$ - полімер називається еластомером.
Якщо $T_c > 20^\circ C$ - це конструкційний полімер.**

Склоподібний та крихкий стан полімерів

Температура склування - це температура, за якої ПМ переходить з високоеластичного стану в склоподібний.

2.2.3. ПЕРЕХІД У СКЛОПОДІБНИЙ СТАН

Процес склування. У високоеластичному стані ПМ при охолодженні зменшується вільний об'єм (не зайнятий макромолекулами). При цьому температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) на 1 - 2 порядки вищий, ніж для металів.

При зменшенні вільного об'єму приблизно до 2,5% розміри порожнин (дірок) стають малими, і тепловий рух сегментів припиняється.

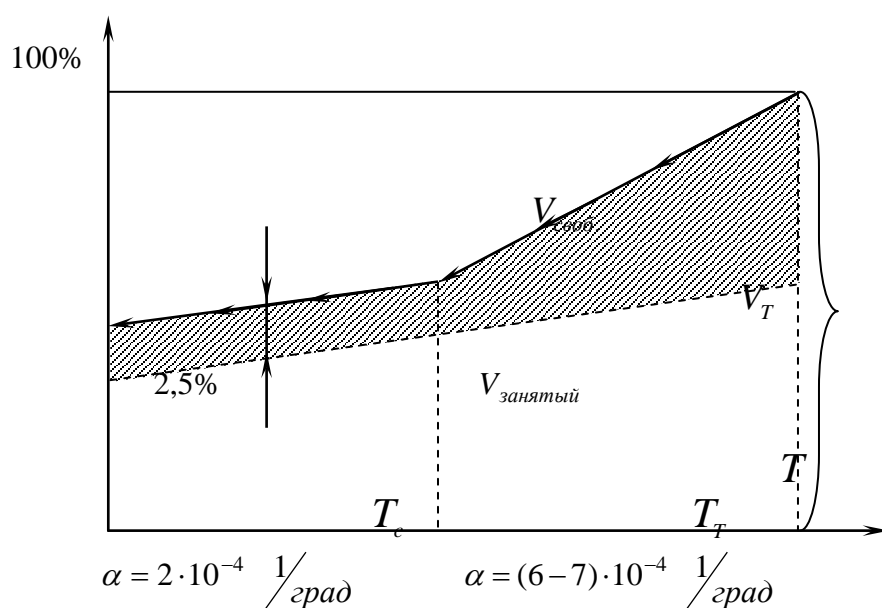


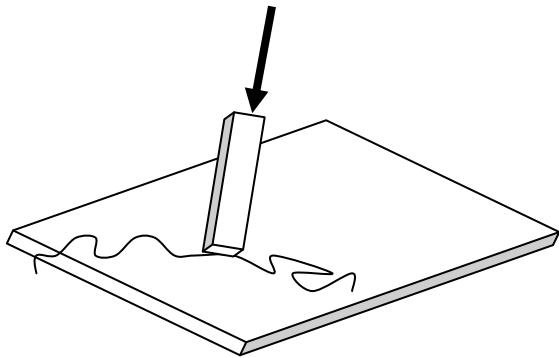
Рис. 2.7 – Зміна вільного об'єму при охолодженні полімеру

Температура склування (T_c) - це температура, при якій V_v зменшується до 2,5% і полімер стає склоподібним.

Нижче T_c вільний об'єм не зменшується. Зменшення лінійних розмірів відбувається лише за рахунок зменшення міжмолекулярних відстаней.

Структурне склування - це перехід полімеру в склоподібний стан за рахунок зменшення температури.

Перехід в склоподібний стан за рахунок збільшення швидкості навантаження називається **механічним склуванням** (при $T > T_C$).



Приклад: удар по плиті з поліпропілену ріжучим інструментом

На температуру склування впливають:

- а) гідростатичний тиск (збільшує T_C);
- б) молекулярна маса (збільшує T_C);
- в) пластифікатори - речовини, що мають малу летючість, високу температуру кипіння і низьку температуру замерзання (еластомери, каучук). Вони збільшують V_B і знижують T_C .

2.2.4. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ У СКЛОПОДІБНОМУ СТАНІ

Склоподібні полімери здатні деформуватися до декількох сотень відсотків (**рис. 2.8**), але не здатні самовільно відновлювати розміри.

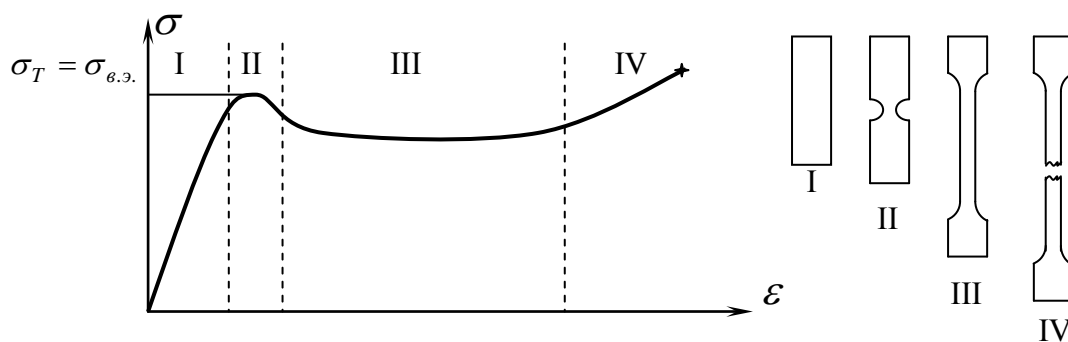


Рис. 2.8 – Діаграма деформування полімеру та її області

На діаграмі деформування аморфного полімера (**рис. 2.8**) виділяють чотири області:

I – пружна деформація полімеру. Змінюється міжмолекулярна відстань і валентні кути без зміщення сегментів і руйнування флуктуаційної сітки.

II – утворення шийки. Мікродофекти створюють концентратор напружень. Перенапруження σ' призводять до вимушених переміщень сегментів. Це орієнтує сегменти у напрямку сили.

Наслідок – локальне ущільнення полімеру, його зміцнення.

Тріщина не зростає, виникає шийка.

III – шийка розповсюджується на всю довжину зразка, і матеріал переходить в орієнтований стан.

Після зняття навантаження розміри відновлюються лише на величину пружної деформації .

При нагріванні розміри частково відновлюються, сегменти набувають рухливості, і макромолекули переходять у вихідний, згорнутий, стан.

Вимушена еластичність – здатність склоподібних полімерів до великих деформацій.

IV – незворотне зміщення сегментів аж до руйнування.

Із зростанням температури зменшується межа вимушеної еластичності - за рахунок збільшення температури відбувається збільшення запасу теплової енергії, і потрібна менша зовнішня енергія для розвитку вимушеної пружної деформації. Це відбивається на вигляді діаграм деформування (**рис. 2.9**). При підвищенні температури міцність полімеру і модуль пружності зменшуються, діаграми деформування розташовуються нижче, ніж при низьких температурах.

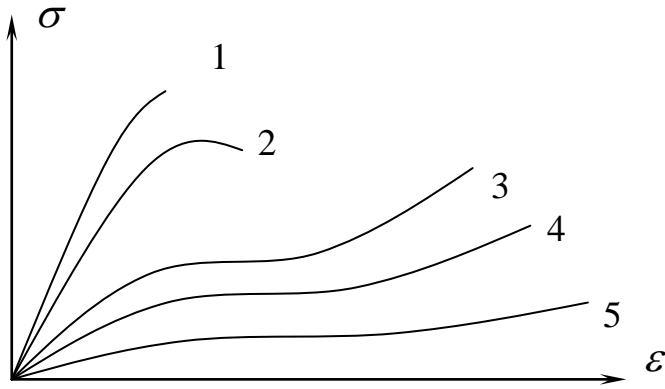


Рис. 2.9 – Діаграми деформування полімеру в різних фізичних станах: крива 1 - $T < T_{кр}$; криві 2, 3, 4 - $T_{кр} < T < T_c$; крива 5 - $T > T_c$.

При $T < T_c$ енергетичний бар'єр U на шляху переміщення сегмента настільки великий, що процес деформування без великих механічних навантажень стає неможливим. Під дією напружень енергетичний бар'єр зменшується:

$$U = U_0 - a \cdot \sigma,$$

де U_0 – енергія активації, тобто той енергетичний бар'єр, який відповідає ненапруженому матеріалу.

Для простих полімерних систем зміну напружень при деформуванні (релаксація) можна описати рівнянням:

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{1}{\tau} \sigma,$$

де τ – час релаксації, тобто час, за який напруження зменшується в e раз. Для τ виконується рівняння Александрова - Гуревича

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{U}{RT}$$

або

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{U_0 - a \cdot \sigma}{RT}.$$

Тут **R** - універсальна газова стала (8.314 дж/град · г/моль), **T** - температура в градусах Кельвіна.

Таким чином, релаксаційні процеси в ПМ відбуваються не лише під впливом теплових рухів, але і під впливом навантаження.

При цьому сегмент накопичує сумарний запас енергії (теплової та механічної), достатній для подолання потенціального бар'єру.

2.3. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІЧНИХ ПОЛІМЕРІВ

До кристалічних полімерів відносяться поліетилен, поліетилентерефталат, поліпропілен, політетрафторетилен і багато інших.

Полімери, що складається із стереорегулярних макромолекул, здатні до кристалізації (у стереорегулярних полімерах замісники знаходяться по відношенню до головного ланцюга в регулярній послідовності).

Полімери, що складаються з атактичних (нерегулярних) макромолекул, до кристалізації не здатні.

При кристалізації макромолекули і їх сегменти розташовуються впо рядковано (виникає «віддалений» порядок в розташуванні макромолекул).

2.3.1. КРИСТАЛІЧНІ СТРУКТУРИ ТА ОСОБЛИВОСТІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

Типи кристалічних структур полімерів

Залежно від умов кристалізації можливе виникнення різних типів кристалічної структури (поліморфізм). З точки зору термодинаміки найбільш вірогідне виникнення кристалів з випрямленим ланцюгом (КВЛ) при температурі T , близькій до температури плавлення $T_{пл}$. Проте ця структура недосяжна кінетично.

Найчастіше виникають кристалічні пластинки (ламелі), **рис. 2.10**.

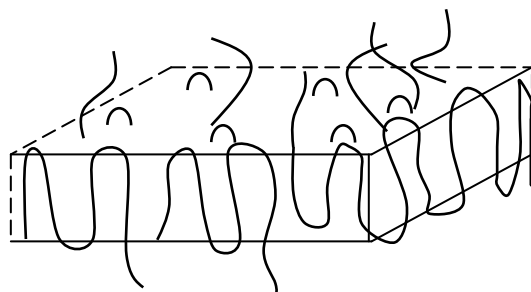


Рис. 2.10 -- Утворення ламелей із складених ланцюгів

Кристали ламелі розділені шарами аморфного незакристалізованого полімеру (**рис. 2.11**).

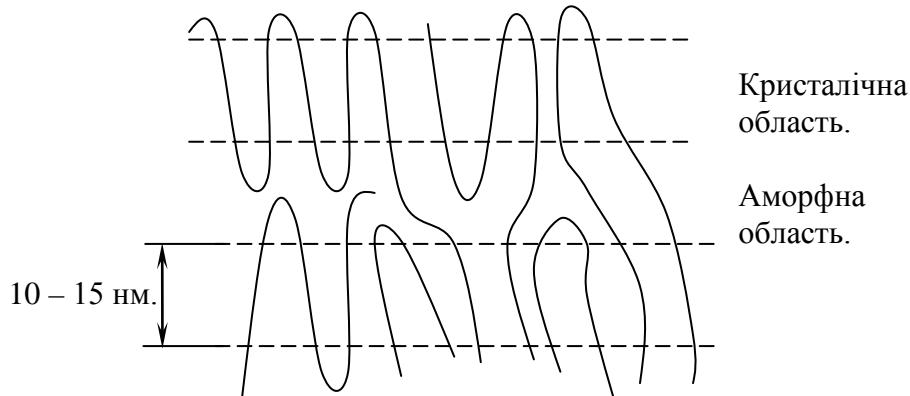


Рис. 2.11 -- *Схема з'єднання ламелей прохідними молекулами*

Якщо довжина ламелі набагато більша від ширини і товщини - це голчасті кристали.

Зазвичай довжина і ширина набагато більші від товщини (пластинчаті структури).

При швидкій кристалізації виникає велике число дрібних кристалів без чітко окресленої межі розділу кристалу і аморфної області. Такі кристалічні утворення називають кристалітами.

Залежно від умов кристалізації, міра кристалізації (доля кристалічної фази) може коливатися в прибудовах від 20 до 80%.

Окрім пластинчатої і голчастої структури в полімерах утворюються сфероліти - кристалічні утворення округлої форми (**рис. 2.12**). Сфероліт складається з ламелей, що ростуть з єдиного центру. Вони розділені аморфними прошарками.

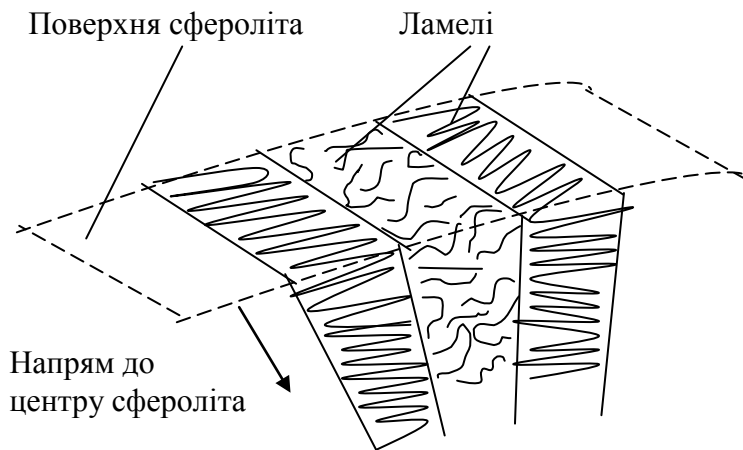


Рис. 2.12 -- Будова сфероліту

Особливості процесу кристалізації

1. Для кристалічних полімерів характерна відсутність постійної температури плавлення. Чим менша швидкості кристалізації, тим досконаліші кристали, тим вища $T_{пл}$.

2. Для ПМ характерний інтервал температури плавлення .

Це обумовлено неоднорідністю структури та різними розмірами кристалів.

3. Температура $T_{пл}$ і температура кристалізації не збігаються. Це є наслідком сповільненості релаксаційних процесів, необхідних для утворення кристалічної структури.

2.3.2. ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІЧНИХ ПОЛІМЕРІВ ПРИ РОЗТЯЗІ

Крива «напруження - деформація» кристалічних полімерів.

Із зростанням міри кристалізації, полімер стає більше жорстким. При збільшенні аморфної фази - навпаки. В цілому, кристалічні полімери менш крихкі, ніж склоподібні.

В цілому, діаграми деформування кристалічних полімерів схожі з діаграмами найбільш міцних аморфних полімерів (рис. 2.13)

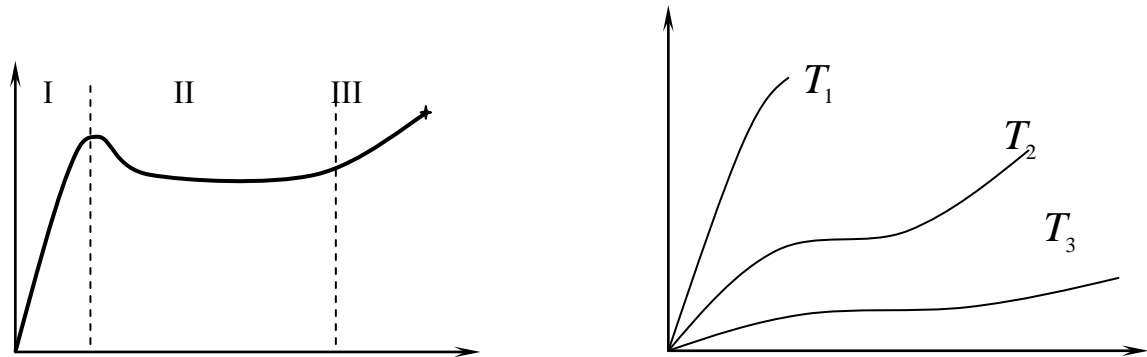


Рис. 2.13 -- Діаграми деформування кристалічних полімерів

I - пружна деформація (деформація незруйнованих кристалів);

II - початок мікроруйнувань (аналогічно із склоподібними полімерами); при цьому виникає мікродфект, утворюються перенапруження, починається розвиток мікротріщини і сегменти орієнтуються у напрямі діючої сили.

Пластична деформація обумовлена ковзанням ламелей вздовж площин (рис. 2.14).

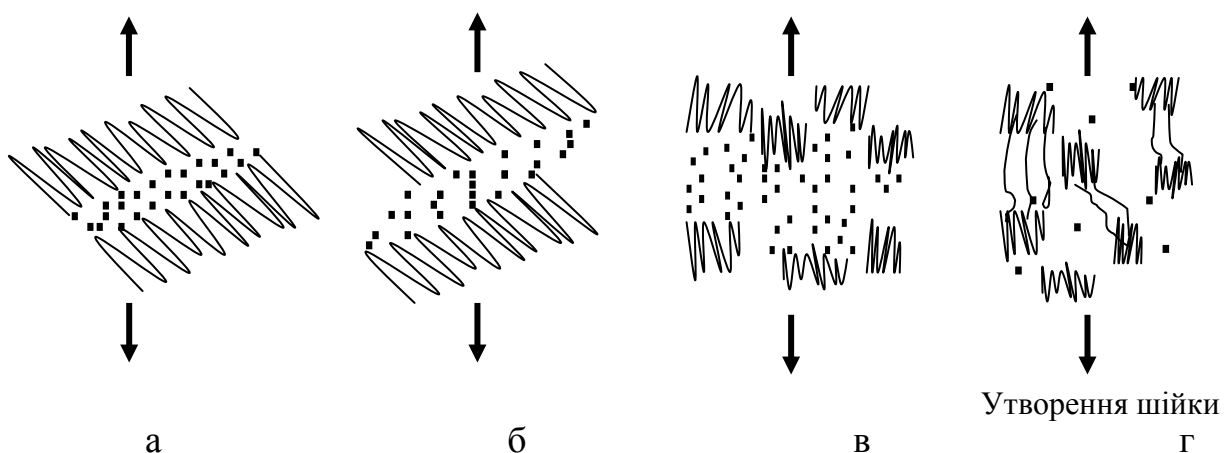


Рис. 2.14 -- Етапи деформування і руйнування кристалічного полімеру

Орієнтовані полімери

Кристалічні полімери піддають примусовому деформуванню при підвищених температурах з подальшим охолодженням в деформованому стані. Цей технологічний процес називається вимушеною (примусовою) орієнтацією. Діаграми деформування орієнтованих ПМ зображені на **рис. 2.15**.

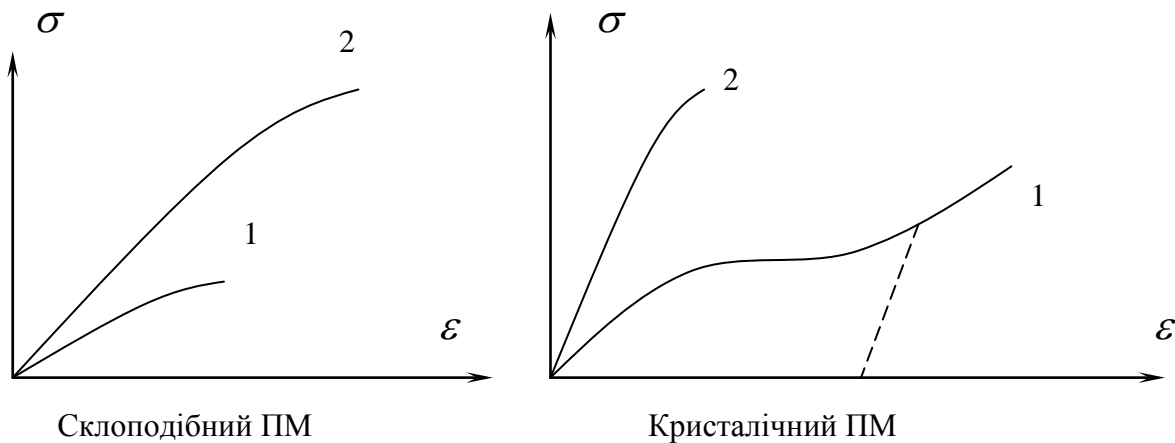


Рис. 2.15 -- Діаграми деформації різних типів полімерів: 1 - полімер до витягу; 2 - полімер після витягу

Орієнтація підвищує міцність і опір ударним навантаженням. Зазвичай плівкові матеріали орієнтують в двох напрямках.

2.3.3. ТЕМПЕРАТУРНІ ДЕФОРМАЦІЇ КРИСТАЛІЧНИХ ПОЛІМЕРІВ

Виникнення та розвиток температурних деформацій

У конструкційних пластмасах при підвищенні температури, поряд з тепловим розширенням, відбувається процес незворотного вкорочення (термоусадка). Таким чином, загальна деформація $\epsilon_{ЗАГ}$ є алгебраїчною сумою двох величин:

$$\epsilon_{ЗАГ} = \epsilon_{\gamma} + \epsilon_{\alpha} ,$$

де ϵ_{γ} – деформація термоусадки; ϵ_{α} – деформація теплового розширення, що не залежить від часу.

Слід зауважити, що ϵ_y у більшості випадків від'ємна або дорівнює нулю, а ϵ_α при збільшенні температури зростає, а при зниженні - зменшується.

При вивченні термомеханічних характеристик полімерних матеріалів, у тому числі конструкційних пластмас, необхідно розділяти загальну деформацію на її складові, оскільки термоусадка і лінійне розширення полімеру являють собою два процеси, що обумовлені різними причинами.

Зазначені складові досліджували за допомогою термокамери. Для підвищення точності деформацію зразка вимірювали оптичним катетометром В-630, встановленим поруч з термокамерою, через оглядове вікно бокової кришки камери, закритої кварцовим склом.

Навантаження зразка в момент вимірювання здійснювали ніжкою контрольного індикатора годинникового типу МИГ-1 зусиллям, не більшим 0.5 Н. При цьому похибка вимірювання, що виникала за рахунок зміни пружних характеристик зразка при зміні температури від 20 до 100⁰С, не перевищувала 0.009 мм. Деформацію вимірювали з точністю ± 5 мкм при робочій довжині зразка 100 мм. Температуру підтримували з точністю $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Щоб виключити похибки, пов'язані з тривалістю нагріву зразків до заданої температури, коефіцієнт лінійного теплового розширення (КЛТР) α визначали за деформацією, що виникала при охолодженні зразка від температур 40, 60, 80 та 100⁰С до кімнатної. Зразок охолоджували спеціальним вентилятором протягом 5 хв. Попередніми експериментами з використанням мідь-константанових термопар показано, що час охолодження зразка від температури 100⁰С до кімнатної не перевищує 3 хв і деформацією термоусадки, що відбувається в зразку за цей час можна знехтувати.

Визначення коефіцієнтів температурного лінійного розширення

Цю характеристику вимірювали на кондиціонованих зразках, відпалених при температурі 100⁰С протягом 5 діб, що практично усунуло термічну усадку, яка могла б вплинути на вимірювання. Кількість зразків, випробуваних при кожній температурі, - не менша 5. Результати вимірювання температурних деформацій зразків поліетилентерефталатних (ПЕТФ) плівок товщиною 26 ... 37 мм приведені на **рис. 2.16**.

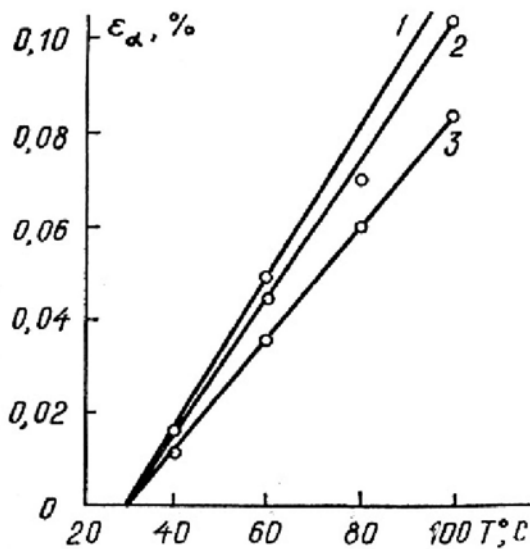


Рис. 2.16 – Температурні деформації зразків ПЕТФ PE (лінія 1), ПЕТФ 4406 (2) та ПЕТФ 4226 (3)

Як видно, залежності зазначених деформацій вивчених матеріалів від температури в діапазоні 20 ... 100⁰С мають практично лінійний характер і КЛТР матеріалу ПЕТФ в зазначеному діапазоні температур практично не залежать від температури, тобто

$$\alpha = \varepsilon_{\alpha} / \Delta T, \quad (2.1)$$

де ε_{α} – відносна деформація при зміні температури зразка на ΔT^0 .

Значення КЛТР ряду марок ПЕТФ плівок наведені в **табл. 2.1**. Відзначимо, що збільшення температурного інтервалу при вимірюванні КЛТР суттєво знижує розкид результатів. Так, коли при вимірюванні зазначених коефіцієнтів шляхом зниження температури від 40⁰С до кімнатної коефіці-

енти варіації становили 12 ... 17%, то при збільшенні верхньої границі температурного інтервалу до 60⁰С коефіцієнти варіації знизилися до 4 ... 9%.

Таблиця 2.1.

Коефіцієнти лінійного температурного розширення поліетилентерефталатних плівок

Марка ПЕТФ	Товщина, мкм	$\alpha \cdot 10^5$, град ⁻¹
ПЕТФ PE	30	1.40
ПЕТФ 4406	37	1.30
ПЕТФ 4321	26	1.04
ПЕТФ Ampex	28	2.08
ПЕТФ Pyral	34	2.07
ПЕТФ Fuji-Film	26	1.58

Термічна усадка при постійній температурі

Для вимірювання усадки полімерних плівок використовували зразки довжиною 250 мм. Стрічку у вільному (ненапруженому) стані піддавали нагріву і ізотермічній витримці при температурах 60, 80, 100 ° С протягом 8 год. і в відповідні інтервали часу вимірювали її деформацію.

Швидкість нагріву термокамери становила 1.5 ... 2.0 град / хв. Деформацію при нагріванні відмічали через кожні 10⁰С, а при ізотермічній витримці через кожні 15 хв. Термічну усадку матеріалів розраховували за формулою:

$$\epsilon_y = \epsilon_{3AG} - \alpha \cdot \Delta T, \tag{2.2}$$

При цьому використовували значення КЛТР, наведені в **табл. 2.1**. Криві загальної деформації плівки ПЕТФ 4406 при ізотермічній витримці зображені на **рис. 2.2а**, а деформації її термічної усадки, розраховані за формулою (2.2), тобто з урахуванням поправки на теплове розширення -

на рис. 2.2б. Як видно з рис. 2.2а, в початковий момент (перші 20-30 хв.) теплове розширення переважає над усадкою ($\epsilon_\alpha > |\epsilon_y|$) і загальна деформація зразків додатна. В подальшому інтенсивно розвиваються термоусадочні явища ($|\epsilon_y| > \epsilon_\alpha$), і загальна деформація $\epsilon_{\text{ЗАГ}}$ змінює знак.

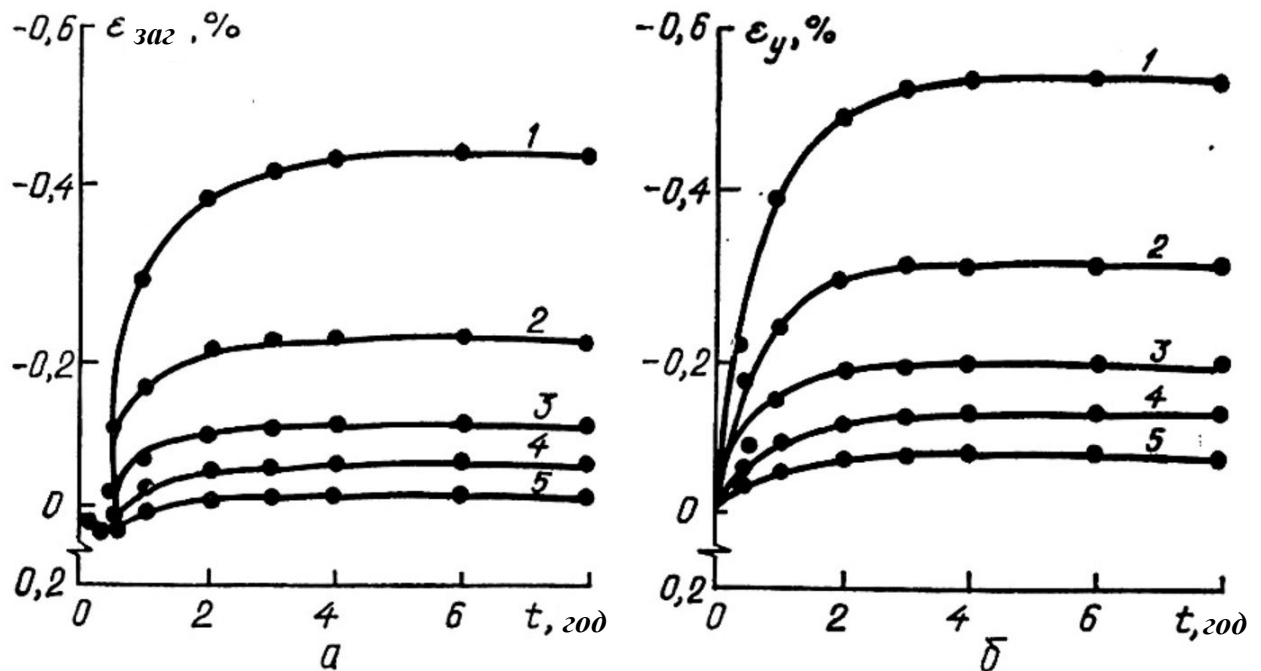


Рис. 2.2 – Залежності загальної деформації (а) і деформації термічної усадки (б) плівки ПЕТФ 4406 від часу ізотермічної витримки при температурах 100°C (1), 90 (2), 80 (3), 70 (4) і 60°C (5)

Ступінь термічної усадки суттєво залежить від температури, при якій відбувається процес (рис. 2.2б). Так, коли після двогодинної витримки при 60°C деформація термічної плівки ПЕТФ 4406 не перевищила 0,062%, то за той же час при 100°C деформація досягає 0,5%.

Як показали експерименти, швидкість усадки плівки ПЕТФ 4406 при 100°C наближається до нульового значення лише після 4-6 годин витримки. На відміну від ПЕТФ 4406 плівка ПЕТФ РЕ має значно більшу усадку, а процес протікає набагато швидше: вже після тригодинної витримки при температурі 100°C швидкість усадки наблизилася до нульового значення

(рис. 2.3). Таким чином, для різних марок плівок, виготовлених з ПЕТФ, при одній і тій самій температурі ступінь загасання усадки різна.

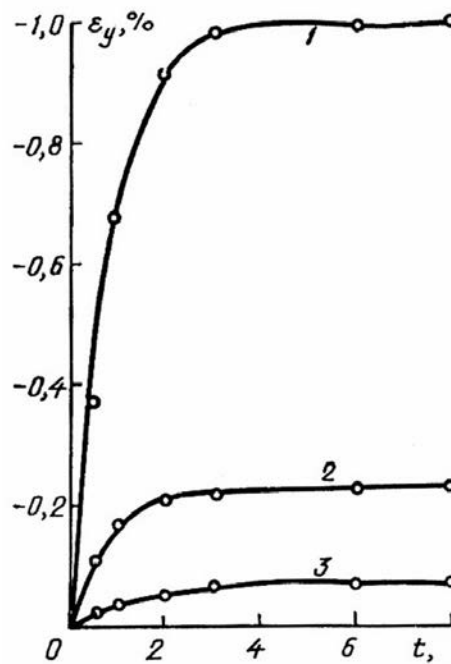


Рис. 2.3 – Криві термічної усадки ПЕТФ РЕ при температурах 100°C (1), 80 (2), 60°C (3)

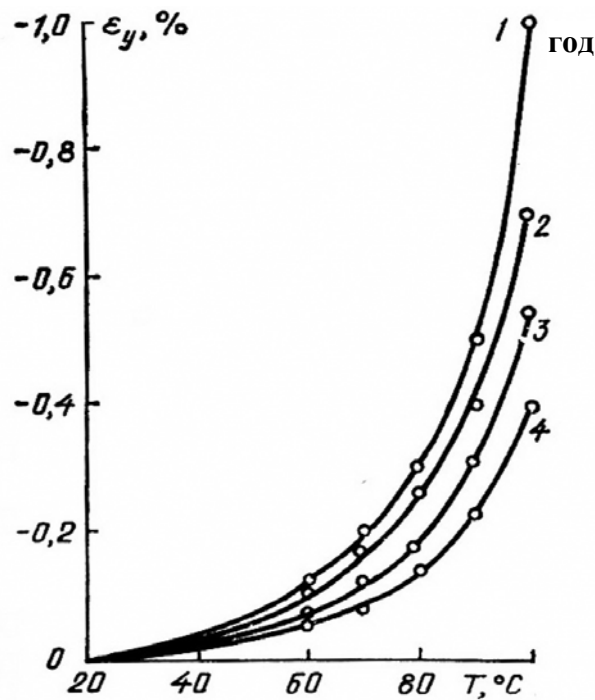


Рис. 2.4 – Ізохронні криві деформації термічної усадки плівок:
1 - ПЕТФ РЕ, час витримки 8 год; 2 - ПЕТФ РЕ, 1 год; 3 - ПЕТФ 4406, 8 год; 4 - ПЕТФ 4406, 1 год

Залежності деформації усадки зразків плівок ПЕТФ РЕ і ПЕТФ 4406 від температури при фіксованих терміна витримки 1 і 8 год. зображені на **рис. 2.4**. Отримані ізохронні криві усадки показують, що температурні залежності ε_y для досліджених плівок носять нелінійний характер, причому швидкість зростання деформації усадки з підвищенням температури у ПЕТФ РЕ істотно вища, ніж у ПЕТФ 4406. Якщо при температурі 60°C криві усадки цих стрічок практично збігаються, то при 100° С деформація усадки ПЕТФ РЕ більша від деформації ПЕТФ 4406 майже вдвічі у всьому дослідженому часовому діапазоні і після двогодинної витримки складає 1%.

Характерні криві термічної усадки ПЕТФ плівок, випробуваних при температурі 80°C, побудовані на **рис. 2.5**. Дані про максимальні значення деформації усадки $\varepsilon_{y\infty}$, що розвиваються при вказаній температурі, наведені в **табл. 2.2**.

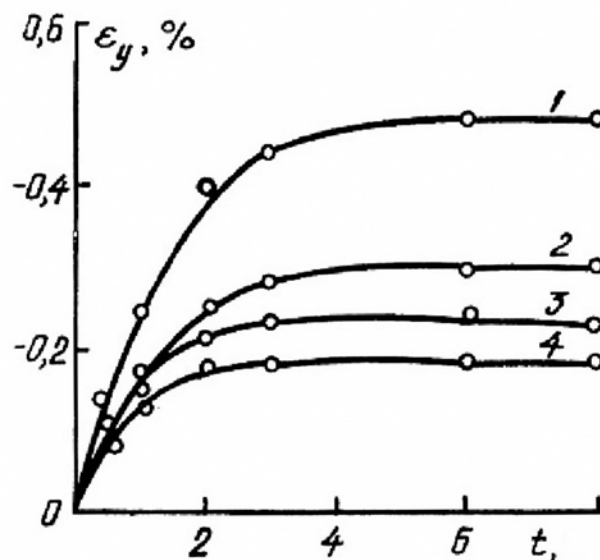


Рис. 2.5 – Криві термічної усадки при температурі 80°C ПЕТФ Атрех-799 (1), ПЕТФ Атрех-786 (2), ПЕТФ РЕ (3) та ПЕТФ 4406 (4)

Наведені вище експериментальні криві залежності деформації усадки від часу перебування зразків при постійній температурі показують, що швидкість усадки велика в початковий період процесу і порівняно швидко згасає з часом. Це дає підстави представити залежність швидкості процесу ізотермічної усадки від часу таким виразом:

$$\frac{d\varepsilon_y(t)}{dt} = B \cdot t^{k-1} \cdot \exp(-\gamma \cdot t^k) \quad (2.3)$$

де B , γ та k - сталі.

Інтегруючи (2.3), отримаємо залежність між деформацією усадки і часом:

$$\varepsilon_y(t) = -\frac{B}{\gamma k} \cdot \exp(-\gamma \cdot t^k) + C \quad (2.4)$$

Константи, що входять в (2.4), визначаємо наступним чином. У початковий момент процесу при $t = 0$ деформація усадки незначна ($\varepsilon_y = 0$) та

$$C = \frac{B}{k \gamma} \quad (2.5)$$

При досить тривалій витримці ($t \rightarrow \infty$) деформація прагне до свого граничного значення $\varepsilon_{y\infty}$. Враховуючи, що в цьому випадку перший член правої частини (2.4) дорівнює нулю, отримуємо

$$C = \frac{B}{k \gamma} = \varepsilon_{y\infty} \quad (2.6)$$

Остаточно маємо:

$$\varepsilon_y(t) = \varepsilon_{y\infty} [1 - \exp(-\gamma \cdot t^k)] \quad (2.7)$$

Отримане рівняння, як показують наведені вище експериментальні дані, задовільно описують процес термічної усадки ПЕТФ плівки. Конста-

нти в цьому рівнянні отримують безпосередньо з експериментальних даних за методом найменших квадратів.

Значення коефіцієнтів рівняння (2.7) для ПЕТФ плівки 4406 при різних температурах наведені в табл. 2.2, а значення цих коефіцієнтів для різних типів МЛ, випробуваних при 80°C, надані в табл. 2.3.

Криві термічної усадки, побудовані з використанням рівняння (2.7), зображені на рис. 2.2б та на рис. 2.5. Точками відзначені експериментальні результати.

Таблиця 2.2.

Коефіцієнти рівняння термічної усадки (2.7) ПЕТФ плівки 4406 при різних температурах

Коефіцієнти	Температура, °C				
	60	70	80	90	100
$\epsilon_{y\infty} \cdot 10^2$	-0.068	-0.125	-0.180	-0.305	-0.540
k	1.11	1.04	1.00	0.96	0.93
$\gamma \cdot 10^5$	13.20	20.00	42.75	56.45	64.76

Таблиця 2.3.

Коефіцієнти рівняння термічної усадки (2.7) різних марок ПЕТФ плівок при температурі 80°C

Марка ПЕТФ	Коефіцієнти		
	$\epsilon_{y\infty} \cdot 10^2$	k	$\gamma \cdot 10^5$
ПЕТФ PE	-0.230	1.02	31.77
ПЕТФ 4406	-0.180	1.00	42.75
ПЕТФ 4321	-0.150	0.81	125.29
ПЕТФ Ampex	-0.210	1.08	12.18
ПЕТФ Scotch	-0.325	1.12	6.68
ПЕТФ Fuji-Film	-0.275	1.17	5.34

Розрахунки показали, що середньоквадратична похибка апроксимації для досліджених ПЕТФ не перевищує 5.5% в інтервалі часу до 8 год. Максимальна розбіжність експериментальних і теоретичних результатів не перевищує $\pm 12\%$. Відзначимо, що коефіцієнти $\varepsilon_{y\infty}$ та γ істотно залежать від температури, величина коефіцієнта k в діапазоні температур 70-100°C близька до одиниці.

Таким чином, наведене рівняння (2.7) може бути використане в інженерних розрахунках для оцінки ізотермічної усадки полімерних матеріалів в експлуатаційному інтервалі температур.

Термічна усадка при циклічних змінах температури.

У ряді випадків виробу, виготовлені з конструкційних пластмас, працюють в нестационарних температурних режимах. Одним з найбільш поширених режимів є температурні цикли з постійними періодами часу. Особливість процесів усадки в зазначених умовах: усадка не зупиняється за більш тривалого часу, ніж в ізотермічних умовах для тих самих полімерів, і має більш складну кінетику.

Усадку в зазначених умовах, так само як і ізотермічну усадку, досліджують на експериментальній установці для вимірювання температурних деформацій. Досліди проводять на зразках шириною до 10 мм. Щоб запобігти жолобленню плівки при проведенні експериментів, до зразків в поздовжньому напрямі прикладали розтягувальне зусилля 0.4 Н.

Кожен цикл зміни температури складався з нагрівання зразка, витримки його при постійній температурі (60, 80 або 100°C) протягом 30 хв. і охолодженні до 30°C. Зразки нагрівали і охолоджували з постійною швидкістю 1.25°C / хв.

Типовий графік зміни деформації ПЕТФ при циклічній зміні температури зображений на **рис. 2.6**. Загальна деформація ПЕТФ, як вказувалося,

складається з деформації усадки (верхня крива) і деформації температурного розширення, що змінюється синхронно з температурою. Таким чином, процес зміни загальної деформації стрічки при циклічній зміні температури не являється монотонним (крива 1, **рис. 2.6**). Відзначимо, що загальна деформація на перших чотирьох циклах зміни температури неодноразово змінює знак. Деформацію усадки, як і раніше, розраховували за формулою (2.2).

Отримані таким чином криві термічної усадки ПЕТФ 4406 та РЕ при зміні температури в діапазонах $30 \dots 60^\circ \text{C}$, $30 \dots 80^\circ \text{C}$, $30 \dots 100^\circ \text{C}$ зображені на **рис. 2.7**.

Відзначимо, що швидкість розвитку усадочних деформацій при циклічно змінних температурах істотно менша від швидкості усадки при постійній температурі (порівнюємо **рис. 2.7, 2.2 і 2.3**).

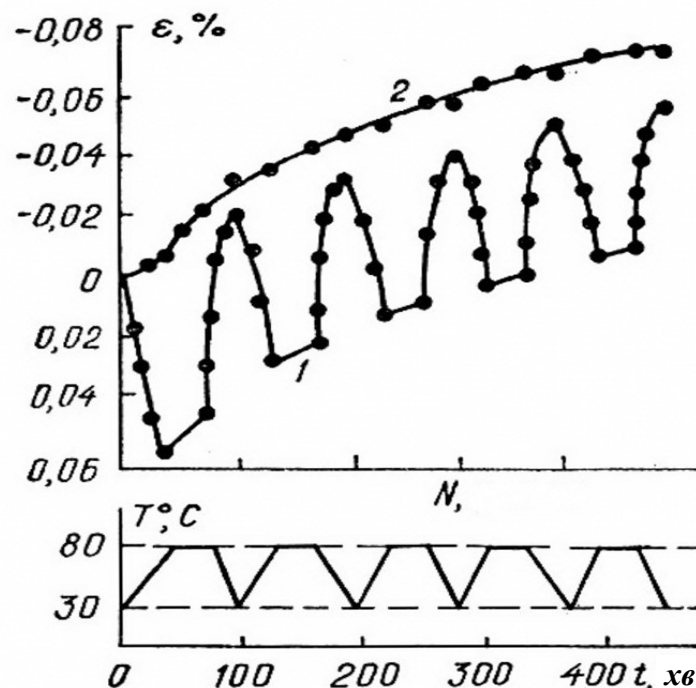


Рис. 2.6 -- Залежності загальної деформації (1) і деформації термічної усадки ПЕТФ 4406 при циклічній зміні температури за програмою, зображеною на нижньому графіку

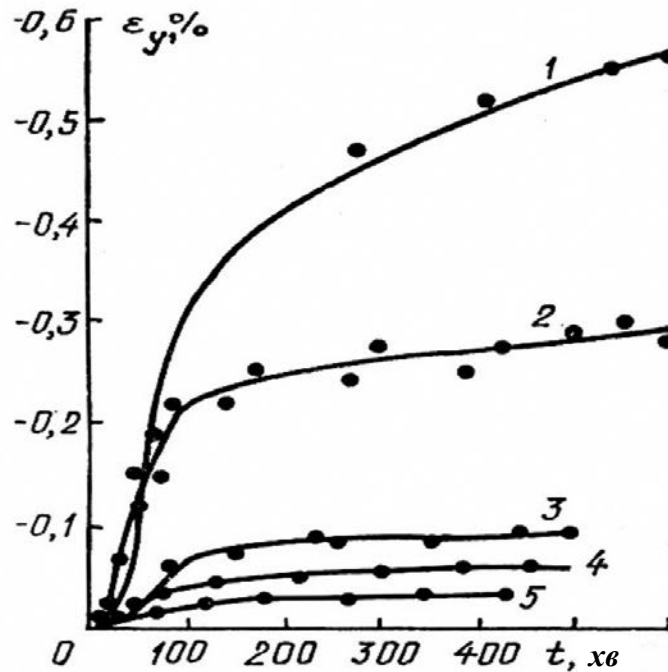


Рис. 2.7. Криві термічної усадки ПЕТФ плівок при циклічній зміні температури: 1 - РЕ, максимальна температура циклу 100°C ; 2 - 4406, 100°C ; 3 - РЕ, 80°C ; 4 - 4406, 80°C ; 5 - 4406, 60°C

Процес циклічної усадки цих ПЕТФ при максимальній температурі циклу 100°C характеризується інтенсивним розвитком деформації в перші 40 ...50 хв з практично постійною швидкістю деформації (рис. 2.7). Для ПЕТФ 4406 ця швидкість потім різко падає і наступні 8-10 год. залишається практично постійною. У ПЕТФ РЕ швидкість деформації термічної усадки безперервно зменшується, але не досягає нуля навіть після 10-годинної циклічної термообробки.

Становить практичний інтерес розгляд процесу зміни деформації, що накопичується в ПЕТФ за один температурний цикл (ϵ_y^*), зі збільшенням числа циклів. Деформацію ϵ_y^* розраховували алгебраїчним відніманням із загальної деформації не тільки деформації температурного розширення, але і деформації усадки, накопиченої до початку даного температурного циклу. Отримані таким чином залежності зображені на рис. 2.8.

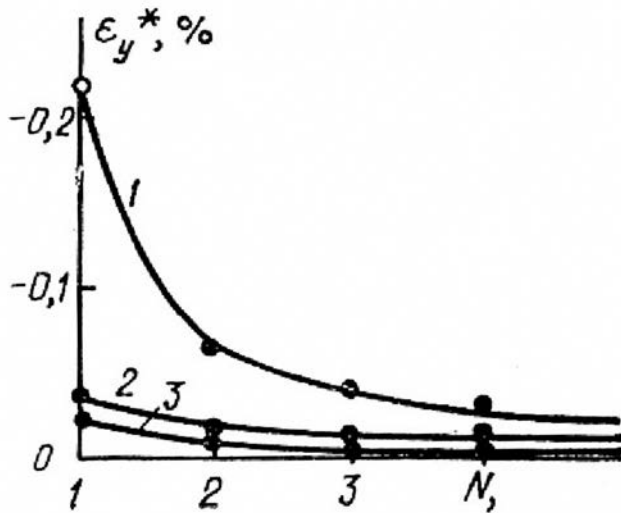


Рис. 2.8. Зміна накопиченої за цикл деформації термічної усадки ПЕТФ 4406 в залежності від кількості циклів при максимальних температурах 100°C (1), 80°C (2) і 60°C (3)

Видно, що зі збільшенням числа температурних циклів усадки, накопичена за кожний наступний цикл, безперервно зменшується. Велика частина деформації усадки розвивається за перший цикл; після п'яти температурних циклів деформація ϵ_y^* за цикл зменшується в 6 ... 15 разів для всіх досліджених температур.

РОЗДІЛ 3. ПОВЗУЧИСТЬ ТА РЕЛАКСАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ

3.1. МЕХАНІЧНІ МОДЕЛІ В'ЯЗКО-ПРУЖНОСТІ

3.1.1. ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО РЕЛАКСАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ

Будь-яка система з рухомими макромолекулами, виведена з рівноваги під дією зовнішніх навантажень, прагне до рівноважного стану (найбільш статистично вірогідному).

Релаксаційним називається процес переходу з нерівноважного в рівноважний стан з максимальною ентропією і мінімальною вільною енергією.

Процес релаксації залежить від рухливості макромолекул. В системі з рухомими макромолекулами рівноважний стан встановлюється швидко і навпаки, при малій рухливості макромолекул рівновага не може бути досягнута.

Розглянемо релаксаційні процеси на прикладах деформування та навантаження в'язко-пружного стрижня.

Релаксація напружень - зміна напруження в стрижні при дії постійної деформації (схема деформування об'єкту зображена на **рис. 3.1**):

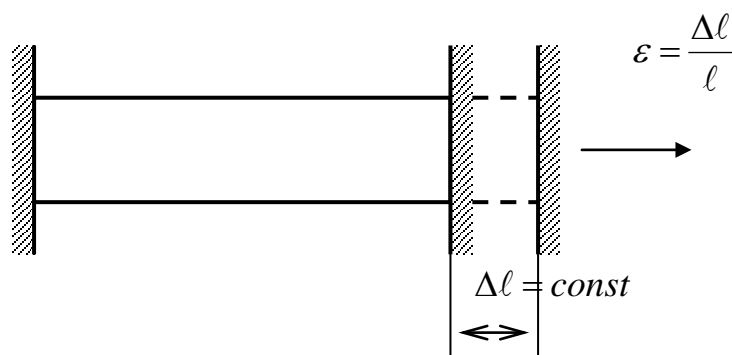


Рис. 3.1 – Стрижень під дією постійної деформації

Описання процесу :

В початковий момент часу (при $t = 0$) стрижень розтягується на величину Δl (відносна деформація $\varepsilon = \varepsilon_0 = \Delta l / l$) та в стрижні виникає напруження σ_0 .

Надалі при $t > 0$ стрижень залишається деформованим ($\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$, **рис. 3.2а**), а напруження зменшується за певним законом $\sigma = \sigma(t)$.

Типові криві релаксації напружень зображені на **рис. 3.2б**.

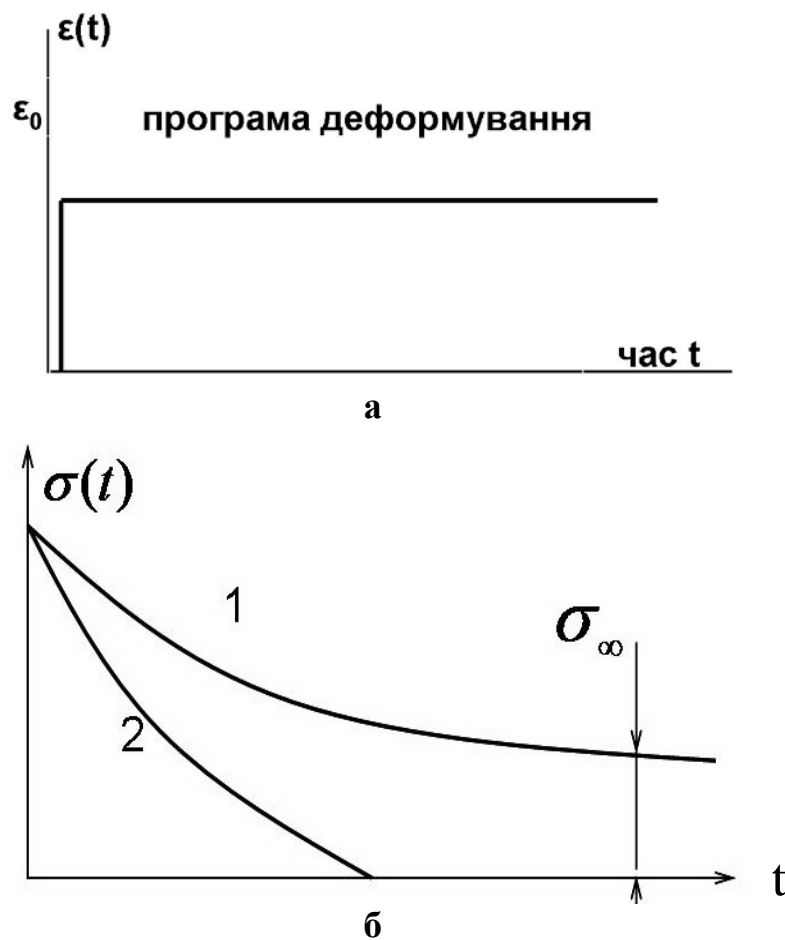


Рис. 3.2 – Програма деформування зразка (а) та типові криві релаксації (б) сітчастого (1) та лінійного полімеру у високо-еластичному стані (2)

Повзучість і редеформація - зміна деформацій в стрижні при дії постійного напруження (схема навантаження об'єкту зображена на **рис. 3.3**):

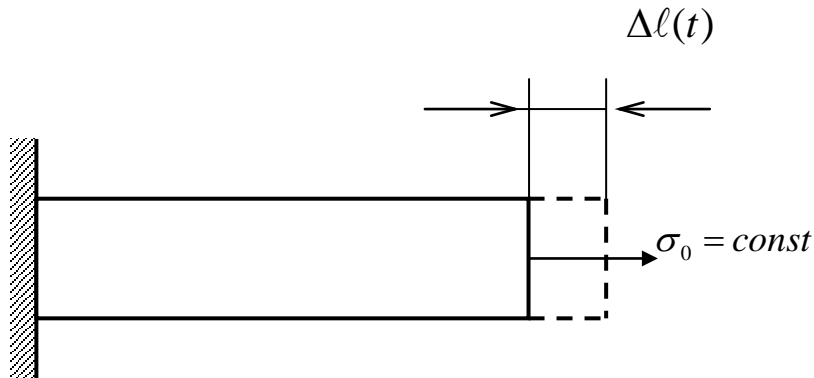


Рис. 3.3 – Стрижень, під дією постійного напруження

Описання процесу :

В початковий момент часу (при $t = 0$) стрижень навантажується з напруженням σ_0 (виникає деформація ϵ_0), яке діє протягом певного часу ($\sigma = \sigma(t)$), після чого стрижень розвантажується. У процесі дії напруження деформація зростає, як показано на **рис. 3.4**, $\epsilon = \epsilon(t)$.

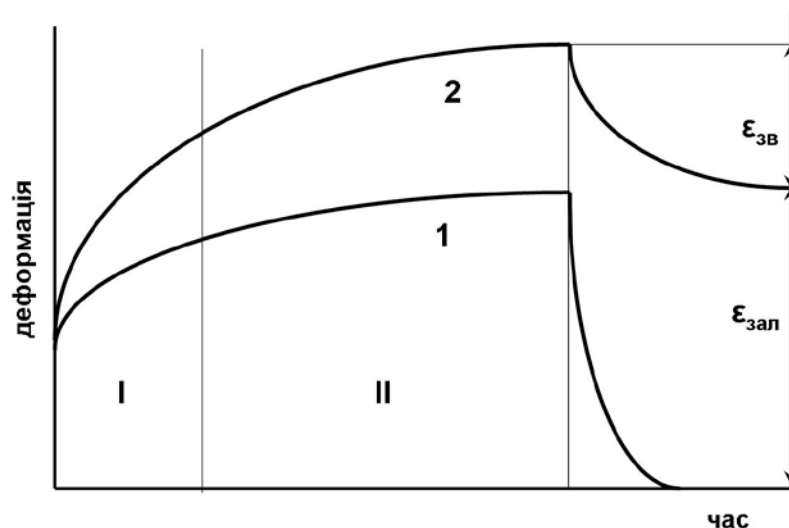


Рис. 3.4 – Типові криві повзучості сітчастого (1) та лінійного полімеру у високо-еластичному стані (2)

Після зняття напруження деформація частково зменшується на величину $\epsilon_{зв} = \epsilon_{зв}(t)$. При цьому частка деформації на даний час не зникає. Цю залишкову («затриману») деформацію позначаємо $\epsilon_{зал}(t)$.

Співвідношення $\epsilon_{зв}$ та $\epsilon_{зал}$ залежить від структури полімеру, температури, часу дії та рівня навантаження.

У лінійному полімері в початковий момент часу відбувається переорієнтація (розворот) макромолекул, вузли флуктуаційної сітки ще не встигли розпастися і перегрупуватися.

Потім відбувається розпад флуктуаційної сітки. Макромолекулярні клубки все більше згортаються. Чим більше згортання, тим менше σ (релаксація).

Після переходу макромолекул у згорнутий стан (статистично найбільш імовірний) механічне напруження зменшується. Відбувається течія макромолекул. Вся еластична деформація переходить в деформацію течії.

У зшитому полімері напруження зосереджуються у вузлах хімічної сітки. Вузли флуктуаційної сітки виявляються розвантаженими, течія не відбувається.

Основні закономірності релаксаційних процесів при малих деформаціях є загальними для склоподібних, кристалічних і високоеластичних полімерів. Тому надалі не будемо робити відмінності між ними.

Складові частини загальної деформації

Повна деформація полімеру складається з таких видів деформації.

1. Миттєво-пружна $\epsilon_{пр}$, що розповсюджується в матеріалі зі швидкістю звуку; вона пов'язана зі зміною валентних зв'язків або кутів, тобто з малою зміною міжмолекулярних та міжатомних відстаней;

2. *Вискоеластична (в'язко-пружна або затримана) ε_{ve} , яка 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.

3. *Миттєво-пластична (незворотна) ε_{nl} , яка виникає одночасно з миттєво-пружною;*

4. *Незворотна в'язка (типу течії) ε_m , яка має місце при значних напруженнях і тривалих навантаженнях.*

При температурах, менших від температури переходу у в'язко-текучий стан, ε_m пов'язана з механізмом високоеластичної деформації, оскільки напрям зміни конфігурації ланцюгових молекул під дією напружень може привести до розпаду флуктуаційної сітки та зміщенню центру ваги молекул, тобто до дійсної (незворотної) течії. Таким чином, повна деформація полімеру

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

де t - заданий час.

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

Більшість конструкційних полімерів працюють в інтервалі температур, які відповідають скловидному стану (стан вимушеної еластичності). В цьому стані 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 стані відіграють миттєво-пластичні й зовсім невелике - незворотні деформації типу течії, тобто (рис. 3.5) $\varepsilon(t) = \varepsilon_{np} + \varepsilon_{ve}(t)$

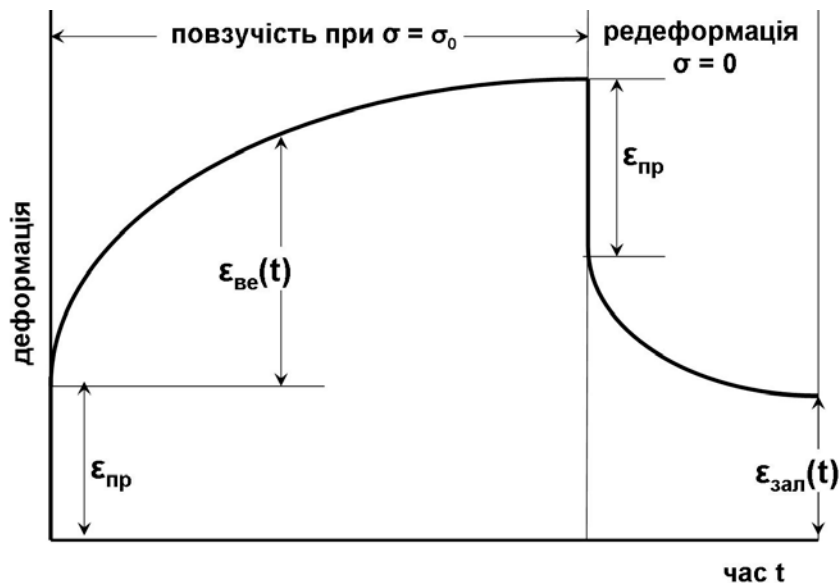


Рис 3.5 – Типова крива повзучості та відновлення розмірів зразка в'язкопружного матеріалу, що знаходиться в склоподібному стані, при розтязі: σ_0 - постійно діюче напруження; $\varepsilon(t)$ - повна деформація зразка; ε_{np} - пружна деформація; ε_{ve} – високоеластична деформація; $\varepsilon_{зал}$ - залишкова (та, що не зникла в даний час t) деформація

3.1.2. МОДЕЛІ МАКСВЕЛЛА, КЕЛЬВІНА-ФОЙГТА ТА БЮРГЕРСА

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

Зв'язок між напруженнями і деформаціями для пружного елемента (рис.3.6а) описується законом Гука

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad , \quad (3.1)$$

де E - миттєвий модуль пружності.

Для в'язкого елемента (рис.3.6б) виконується закон течії Ньютона

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad , \quad (3.2)$$

де η - коефіцієнт в'язкості демпфера.

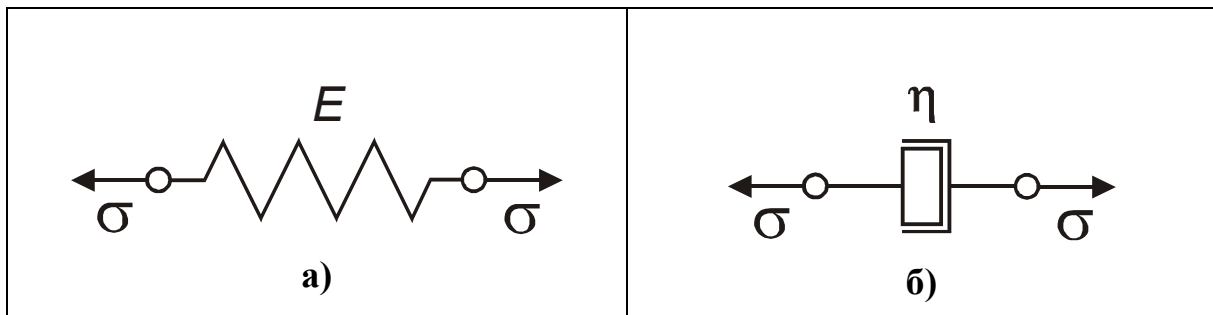


Рис 3.6 -- Пружний (E) та в'язкий (η) елементи

Ці елементи можна з'єднати послідовно або паралельно.

Модель Максвелла

При послідовному з'єднанні маємо модель, яка називається моделлю Максвелла (рис. 3.7).

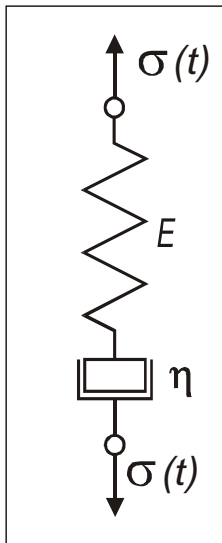


Рис 3.7 -- Модель Максвелла

При такому з'єднанні пружного і в'язкого елементів загальна деформація цих двох елементів дорівнює сумі деформацій кожного елемента, а напруження (зусилля) в елементах однакові:

$$\varepsilon = \varepsilon_{np} + \varepsilon_{ве} , \tag{3.3}$$

$$\sigma_{np} = \sigma_{ве} = \sigma . \tag{3.4}$$

Диференціюємо (3.1):

$$\dot{\varepsilon}_{np} = \frac{1}{E} \dot{\sigma}_{np} . \tag{3.5}$$

Зміна напружень зі швидкістю $\frac{d\sigma}{dt}$ викликає зміну (миттєву реакцію) деформації $\frac{d\varepsilon_{np}}{dt}$.

Диференціюємо (3.3) після підстановки (3.2) і (3.5) з урахуванням (3.4), одержуємо *загальне диференційне рівняння деформування в'язко-пружного тіла за моделлю Максвелла:*

$$\boxed{\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \cdot \sigma} . \tag{3.6}$$

Примітка. Застосування механічних моделей при описанні в'язко-пружних процесів приводить до лінійних диференціальних рівнянь типу

$$\frac{dy}{dt} = P(t) \cdot y + Q(t) = 0 . \quad (*)$$

Його загальний розв'язок має вигляд:

$$y = e^{-\int P(t)dt} \left[C - \int Q(t) e^{\int P(t)dt} dt \right] . \quad (**)$$

При $\varepsilon = \varepsilon_0 = \text{const}$ (релаксація напружень, **рис. 3.2а**) з (3.6) одержуємо:

$$\begin{aligned} \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma = 0 \\ \text{або} \quad \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\tau} \sigma = 0, \end{aligned} \quad (3.7)$$

де $\tau = \frac{\eta}{E}$.

Зіставляючи (3.7) з (*) отримуємо загальний розв'язок $\sigma = e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot C$.

З урахуванням початкових умов (при $t = 0$: $\sigma = \sigma_0$) $C = \sigma_0$.

Остаточно одержуємо $\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$. (3.8)

де $\tau = \eta / E_0$ - час релаксації, тобто час, за який напруження зменшуються в e раз (при $t = \tau$, $\sigma(\tau) = \sigma_0 \cdot e^{-1} = \frac{\sigma_0}{e}$, $e = 2.72$).

При $t \rightarrow \infty$ $-\frac{t}{\tau} \rightarrow -\infty$ и $\sigma \rightarrow 0$, тобто при великому часі t значення напруження σ знижується до нуля.

Коефіцієнт τ характеризує швидкість процесу релаксації, тобто чим більше τ , тим менша швидкість релаксації. Більшому потенційному бар'єру обертання макромолекул, відповідає більший час релаксації τ . З підвищенням температури полімеру T , час релаксації τ зменшується (збільшується рухомість сегментів макромолекул).

Рівняння (3.8) якісно описує криву релаксацію напружень лінійних аморфних полімерів (рис. 3.2б).

Спосіб визначення τ за експериментальними даними

Логарифмуємо (3.8) і одержуємо: $\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{t}{\tau}$.

При будь-якому $t = t'$ напруження $\sigma = \sigma'$ (рис. 3.8)

$$\frac{\ln \sigma_0 - \ln \sigma'}{t'} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\tau}.$$

Таким чином, $\tau = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}$.

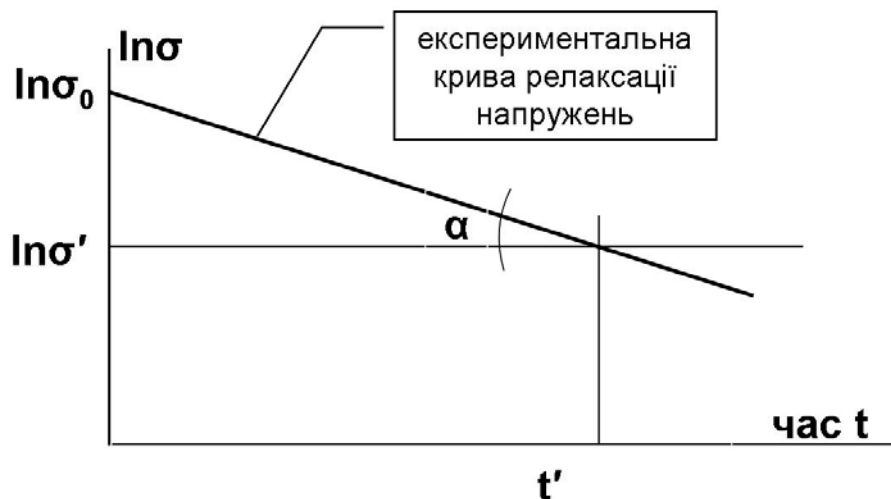


Рис. 3.8 -- Схема, що пояснює спосіб визначення часу релаксації

Рівняння (3.8) можна записати за аналогією із законом Гука в операторному вигляді:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot E(t), \quad (3.9)$$

де $\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_0}$, а $E(t) = E_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$, ε_0 - миттєва деформація, E_0 - миттєвий модуль пружності, $E(t)$ - модуль релаксації (або функція релаксації).

Зауваження. Рівняння (3.8) не відображує процес повзучості при $\sigma = const$. У цьому випадку з (3.8) маємо:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\eta} \sigma.$$

Зіставивши це рівняння з (*) та (**), отримаємо:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\eta} \sigma t + C.$$

При початкових умовах ($t = 0$) $\varepsilon = \varepsilon_0$ та $C = \varepsilon_0$.

У кінцевому вигляді

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \frac{1}{\eta} \sigma t \quad (\text{рис. 3.9}).$$



Рис. 3.9 -- Крива повзучості за моделлю Максвелла

Узагальнена модель Максвелла

Більш точний збіг з експериментальними даними можна отримати, використовуючи узагальнену модель Максвелла (рис. 3.10), що являє собою набір пружних та в'язких елементів.

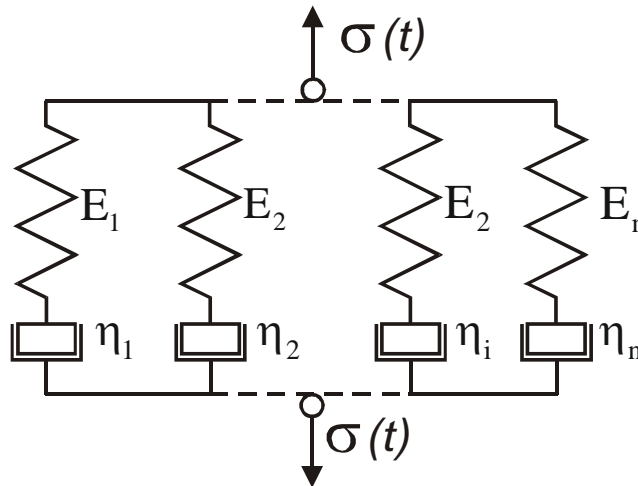


Рис 3.10 -- Узагальнена модель Максвелла

Загальне напруження (зусилля) буде дорівнює сумі зусиль, що діють в кожному елементі:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_{(i)}(t) . \quad (3.10)$$

Напруження в окремому елементі визначається за рівнянням (3.8). Таким чином,

$$\sigma_{(i)}(t) = \sigma_{0(i)} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (3.11)$$

де $\sigma_{0(i)}$ - початкове напруження в і-му елементі, τ_i - час релаксації і-го елемента.

Підставивши (3.11) в (3.10), одержуємо таке рівняння:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_{0(i)} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right). \quad (3.12)$$

Оскільки ε_0 загальне для всіх елементів, то

$$\sigma_{0(i)} = \varepsilon_0 \cdot E_i . \quad (3.13)$$

Підставивши (3.13) в (3.12), одержуємо рівняння, **що відповідає узагальненій моделі Максвелла:**

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \sum_{i=1}^n E_i \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) . \quad (3.14)$$

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

Типова крива релаксації напружень при постійній деформації, що описується рівнянням (3.14), зображена на **рис. 3.11**.

При використанні операторної форми запису (3.9) модуль релаксації має вигляд:

$$E(t) = \sum_{i=1}^n E_i \cdot \exp(-t / \tau_i) . \quad (3.15)$$

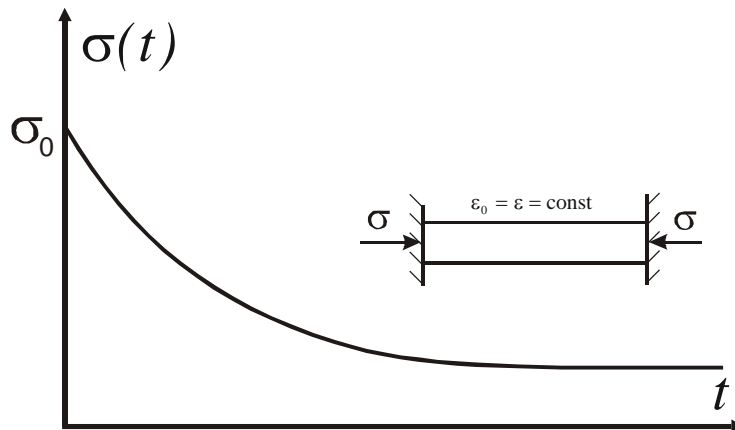


Рис 3.11 -- Крива релаксації напружень у в'язко-пружному матеріалі, якому відповідає узагальнена модель Максвелла та рівняння (3.14).

Модель Кельвіна - Фойгта

З'єднаємо пружний і в'язкий елементи паралельно (рис. 3.12). Таке з'єднання елементів називається моделлю Кельвіна – Фойгта.

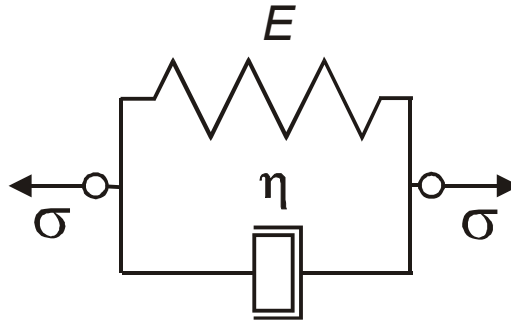


Рис. 3.12 -- Модель Кельвіна – Фойгта

У цьому випадку загальне напруження (зусилля) дорівнює сумі напружень в кожному елементі, а деформації елементів однакові:

$$\sigma = \sigma_{np} + \sigma_{ve} , \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_{np} = \varepsilon_{ve} = \varepsilon . \quad (3.17)$$

З (3.1) та (3.2) виходить, що

$$\sigma_{np}(t) = E \cdot \varepsilon(t) , \quad (3.18)$$

$$\sigma_{ve}(t) = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.19)$$

Підставляючи (3.18) і (3.19) в (3.16), з урахуванням (3.17), отримуємо *диференціальне рівняння, що відповідає моделі Кельвіна - Фойгта*

$$\boxed{\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t) + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt}} . \quad (3.20)$$

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

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot [1 - \exp(-t/\lambda)], \quad (3.21)$$

$$\text{або} \quad \varepsilon(t) = \varepsilon_0 [1 - \exp(-t/\lambda)], \quad (3.22)$$

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

Крива повзучості, що відповідає рівнянню (3.22), зображена на **рис. 3.13**.

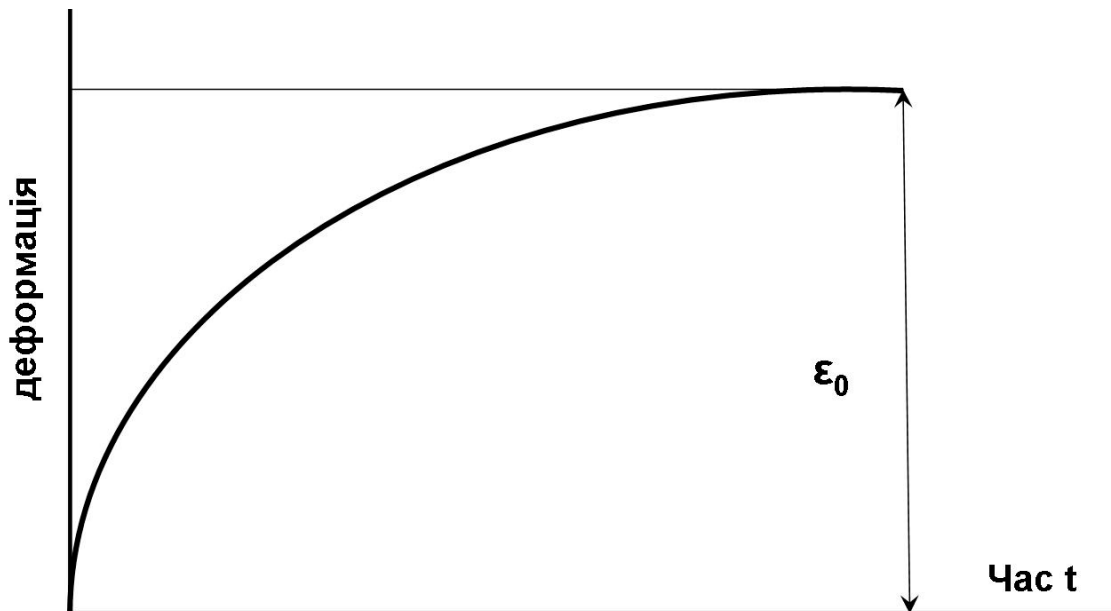


Рис. 3.13 -- Крива повзучості в'язко-пружного матеріалу, якому відповідає модель Кельвіна - Фойгта та рівняння (3.22).

Зауваження. Рівняння (3.20) не відображає процес релаксації напружень при $\varepsilon = const$ (рис. 3.14).

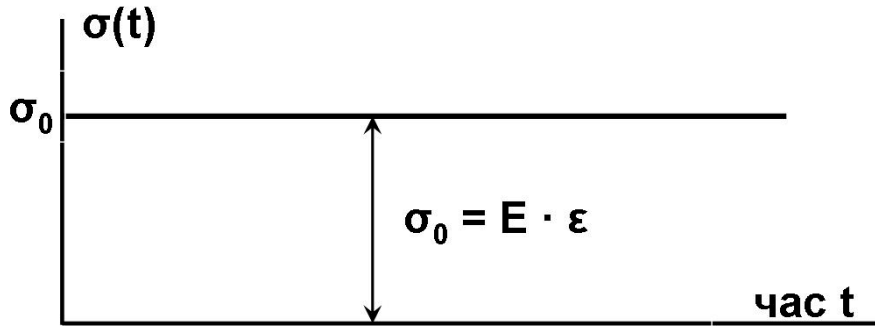


Рис. 3.14 -- Зміна напруження у стрижні згідно рівняння (3.20)

Рівняння (3.22) можна записати в операторному вигляді:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \cdot I(t), \quad (3.23)$$

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

Узагальнена модель Кельвіна-Фойгта

Для підвищення точності опису повзучості використовують узагальнену модель (рис. 3.15), яка утворена послідовним з'єднанням декількох моделей Кельвіна-Фойгта.

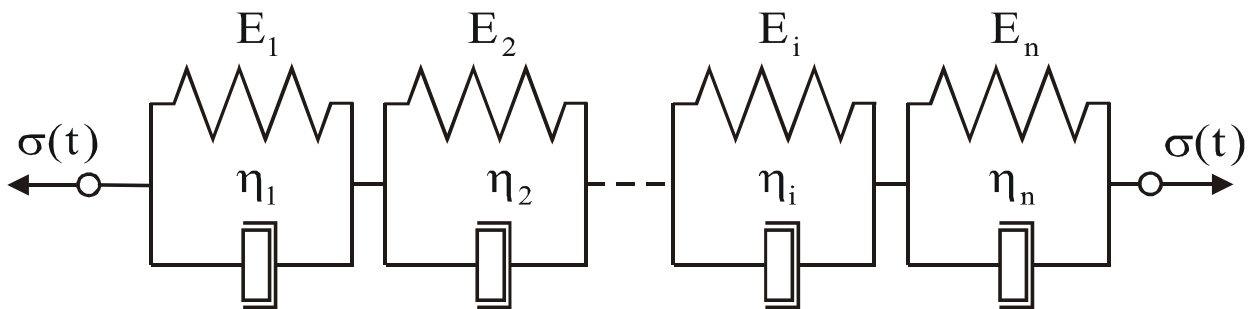


Рис. 3.15 -- Узагальнена модель Кельвіна-Фойгта

Деформація цієї моделі дорівнює сумі деформацій складових елементарних моделей:

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i(t) \quad (3.24)$$

Деформацію окремого елемента записуємо аналогічно до (3.21):

$$\varepsilon_i(t) = \frac{\sigma_0}{E_i} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right) \right]. \quad (3.25)$$

Тоді сумарна деформація

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right) \right], \quad (3.26)$$

де $\lambda_i = \eta_i / E_i$ - час запізнення i -го елемента.

За аналогією з рівнянням в операторному вигляді (3.23):

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \cdot I(t), \quad (3.27)$$

де

$$I(t) = \sum_{i=1}^n I_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right) \right], \quad (3.28)$$

$$I_i = \frac{1}{E_i}. \quad (3.29)$$

Рівняння, що описує повзучість згідно з такою моделлю, в остаточному вигляді записуємо так:

$$\boxed{\varepsilon(t) = \sigma_0 \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \lambda_i)]}, \quad (3.30)$$

Більш точний опис експериментальних кривих повзучості можна одержати, якщо в узагальнену модель Кельвіна-Фойгта ввести елемент з $\lambda_0 = 0$. У цьому випадку рівняння (3.30) та (3.28) запишуться у вигляді:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 I_0 + \sigma_0 \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \lambda_i)]; \quad (3.31)$$

$$I(t) = I_0 + \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t / \lambda_i)], \quad (3.32)$$

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

Типова крива повзучості при постійно діючому напруженні, що описується рівнянням (3.31), зображена на **рис. 3.16**.

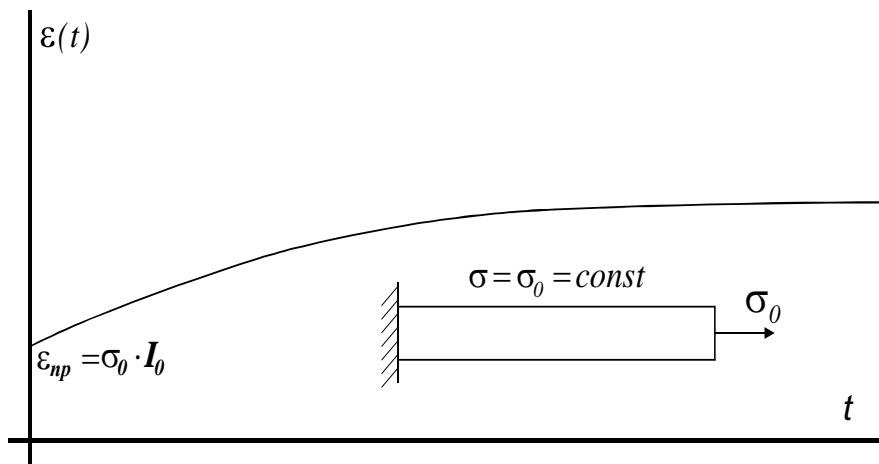
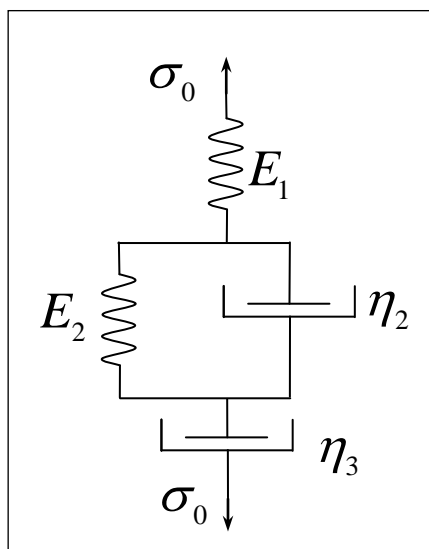


Рис 3.16 -- Крива повзучості в'язко-пружного матеріалу, якій відповідає узагальнена модель Кельвіна-Фойхта та рівняння (3.31)



Модель Бюргера

Модель Кельвіна-Фойхта не описує незворотні деформації, тому іноді застосовують комбіновані моделі. Послідовне та паралельне з'єднання в'язких та пружних елементів дає модель Бюргера, зображену на **рис. 3.17**.

Рис. 3.17 -- Модель Бюргера

Деформація цієї моделі описується рівнянням

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_1} \sigma_0 + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_2}\right) \right] + \sigma_0 \frac{1}{\eta_3} t, \quad (3.33)$$

де $\lambda_2 = \frac{\eta_2}{E_2}$ - параметр, що характеризує два середніх елементи.

Деформації у цій моделі при дії постійного напруження складаються з трьох частин:

- 1-й доданок в формулі (3.33) - миттєво-пружна деформація;
- 2-й доданок - уповільнена пружна, в'язко-еластична;
- 3-й доданок - незворотна в'язка.

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

3.2. ОСНОВНІ РІВНЯННЯ СПАДКОВОЇ В'ЯЗКО-ПРУЖНОСТІ

3.2.1. ПОНЯТТЯ ПРО СПАДКОВУ В'ЯЗКО-ПРУЖНІСТЬ

Матеріали називають *в'язко-пружними*, якщо залежності між σ і ε включають час t . Високомолекулярні матеріали мають властивість «*пам'яті*». Тобто зміна σ і ε після $t = t_1$ залежить від передісторії навантаження при $t < t_1$.

Нехай матеріал витримують при $\varepsilon = const > 0$, потім при $\varepsilon < 0$ і напруження знімається (рис. 3.18).

При відсутності пам'яті, деформація відбувається за штриховою лінією. Реальний матеріал «згадує», що він тривалий час був деформований при $\varepsilon > 0$.

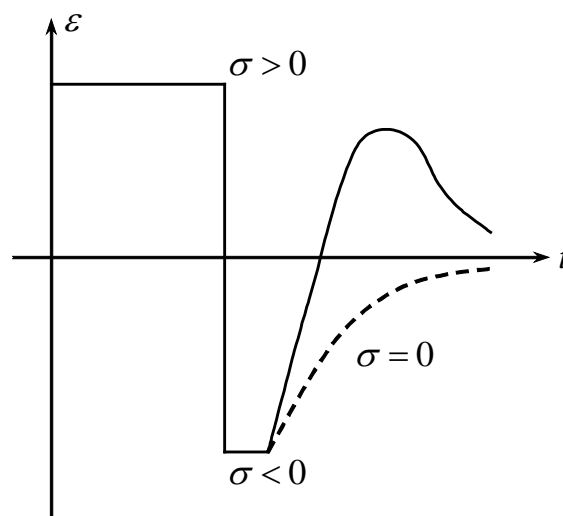


Рис. 3.18 – Деформування стрижня з в'язко-пружного матеріалу з властивістю пам'яті (суцільна крива) без цієї властивості (штрихова лінія)

Для таких матеріалів Больцманом розроблена теорія спадкової в'язко-пружності, яка заснована на принципі суперпозиції.

Гіпотези Больцмана

Гіпотеза перша: пружні сили залежать не тільки від отриманих у даний момент деформацій, але і від попередніх деформацій, які надають тим менший вплив на ці сили, чим більше часу пройшло з моменту дії попередніх деформацій.

І навпаки, пружні деформації залежать не тільки від прикладених у даний момент сил, але і від попередніх сил, які чинять тим менший вплив на ці деформації, чим більше часу пройшло з моменту дії попередніх сил.

Друга гіпотеза: результати впливу діючих в різний час деформацій (тобто пружні сили) складаються. Результати впливу діючих в різний час сил (тобто деформації) складаються.

Зв'язок між напруженнями, деформаціями та часом

Релаксація напружень при одноразовому деформуванні (рис. 3.19).

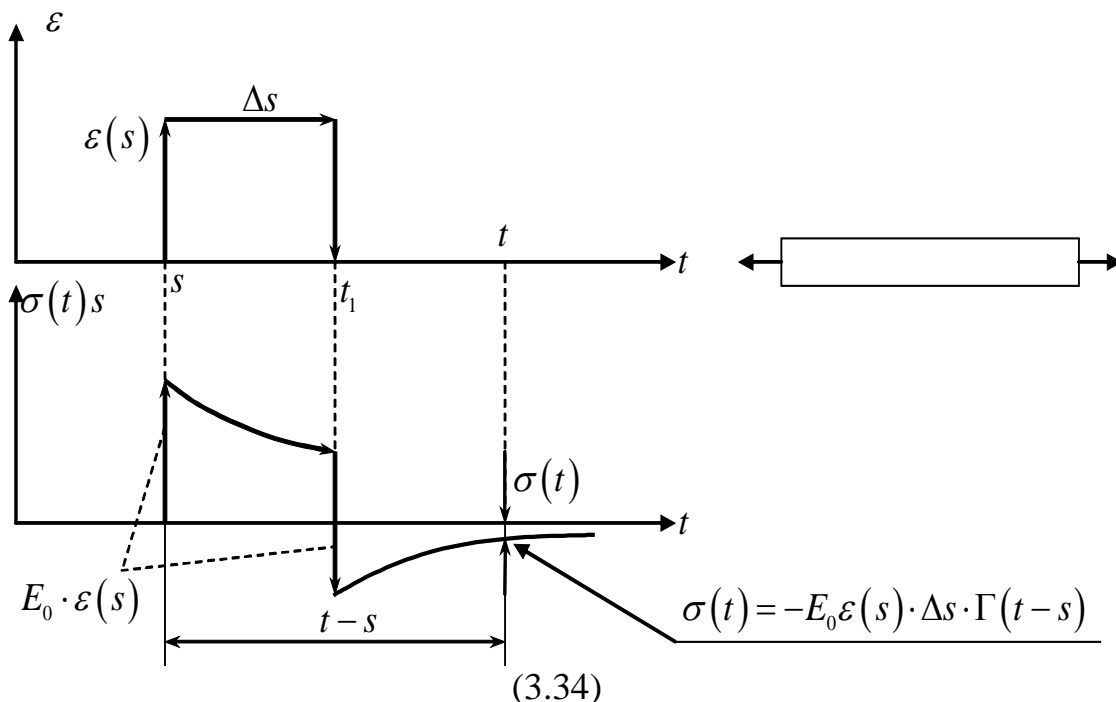


Рис. 3.19 – Одноразове деформування в'язко-пружного стрижня (верхня схема) та відповідна зміна напруження (нижня схема)

Якщо, починаючи з моменту s , тіло протягом часу Δs отримало деформацію $\varepsilon(s)$, то на основі першої гіпотези Больцмана зміна сили в часі t пропорційна добутку $\varepsilon(s) \cdot \Delta s$ та функції $t - s$;

$\Gamma(t - s)$ - функція впливу, що зменшується при зростанні $t - s$.

Повзучість при одноразовій дії напружень (рис. 3.20).

Якщо, починаючи з моменту s , тіло протягом часу Δs зазнавало дію напруження $\sigma(s)$, то на основі першої гіпотези Больцмана зміна деформацій у часі t пропорційно добутку $\sigma(s) \cdot \Delta s$ та функції $t - s$;

$K(t - s)$ - функція впливу, що зменшується при зростанні $t - s$.

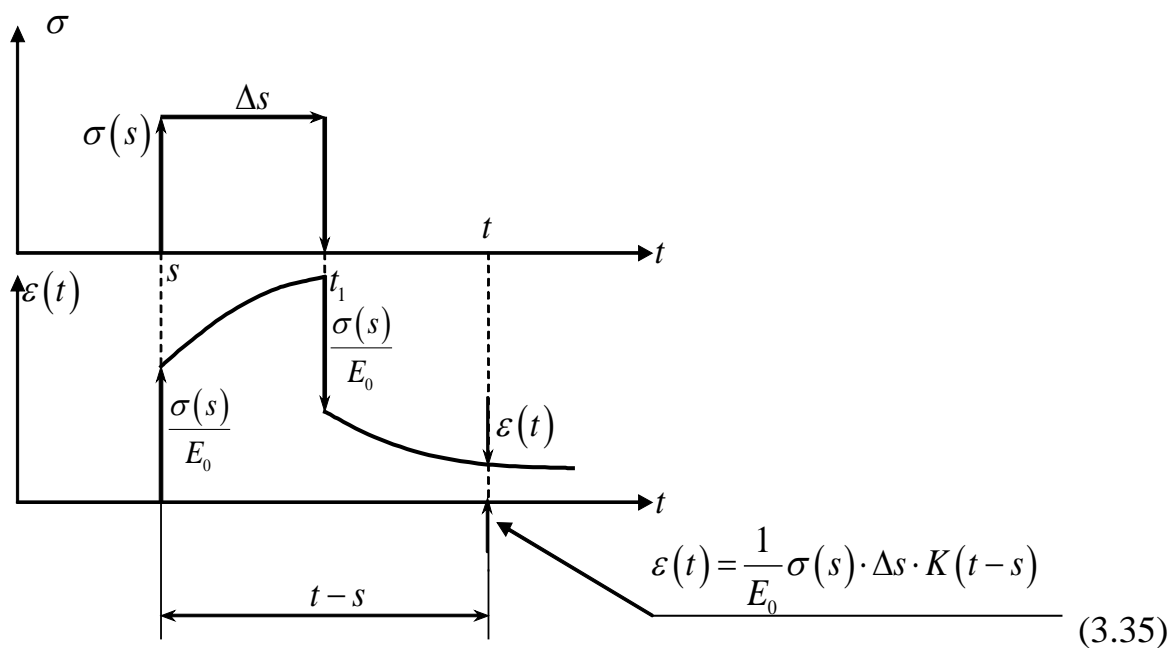


Рис. 3.20 – Одноразове навантаження в'язко-пружного стрижня (верхня схема) та відповідна зміна деформацій (нижня схема)

Релаксація напружень при ступінчастому деформуванні (рис. 3.21).

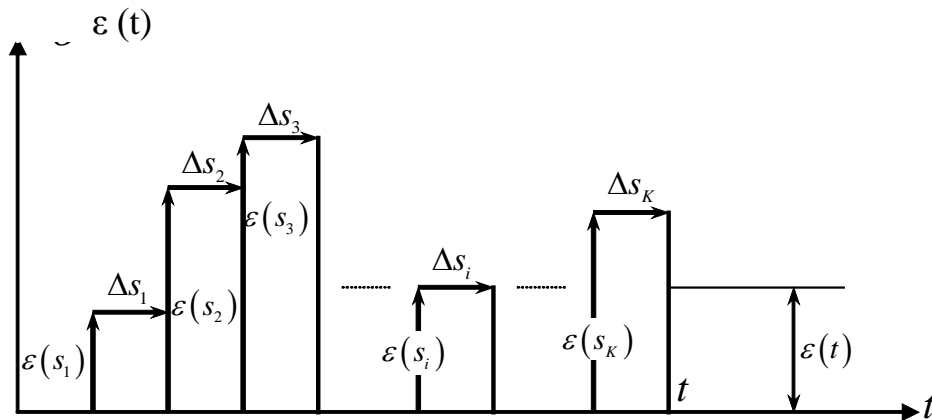


Рис. 3.21 – Ступінчастий закон деформування

У цьому випадку, застосовуючи принцип суперпозиції (друга гіпотеза Больцмана), складаємо всі напруження, що виникають на кожному ступені деформування:

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) - E_0 \sum_{i=1}^K \varepsilon(s_i) \cdot \Delta s_i \cdot \Gamma(t - s_i) \quad (3.36)$$

Релаксація напружень при безперервному деформуванні.

Переходячи до ліміту при $\Delta S \rightarrow 0$, одержуємо:

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) - E_0 \int_0^t \Gamma(t - s) \cdot \varepsilon(s) ds \quad (3.37)$$

Повзучість при ступінчастому навантаженні.

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_0} \sigma(t) + \frac{1}{E_0} \sum_{i=1}^K \sigma(s_i) \cdot \Delta s_i \cdot K(t - s_i)$$

Повзучість при дії напруження, що змінюється безперервно.

Переходячи до ліміту при $\Delta S \rightarrow 0$, одержуємо:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_0} \sigma(t) + \frac{1}{E_0} \int_0^t K(t-s) \sigma(s) ds, \quad (3.38)$$

У деяких випадках зручніше записувати так:

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) - \int_0^t E_1(t-s) \cdot \varepsilon(s) ds \quad (3.39)$$

$$\varepsilon(t) = I_0 \sigma(t) - \int_0^t I_1(t-s) \cdot \sigma(s) ds \quad (3.40)$$

де $E_1(t) = E_0 \cdot \Gamma(t); \quad I_0(t) = \frac{1}{E_0}; \quad I_1(t) = \frac{K(t)}{E_0}.$

Рівняння (3.37) і (3.38) можна розглядати як взаємно зворотні, оскільки одне з них є розв'язком іншого. Це рівняння Вольтера II роду. Ядро $K(t-s)$ є резольвентою ядра $\Gamma(t-s)$ і навпаки.

Проводячи експерименти при деформаціях або напруженнях, що змінюються східчасто, принцип Больцмана можна трактувати таким чином: «напруження в момент часу t , що виникає в результаті деформування в попередні моменти часу, є сумою напружень, які спостерігалися б у момент t , якщо б кожна із постійних деформацій діяла незалежно один від одної».

Тобто, якби деформації прикладалися східчасто в моменти s_1, s_2, \dots, s_K , то напруження в момент часу t :

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^K \Delta \varepsilon(s_i) \cdot R(t-s_i) \quad (3.41)$$

Аналогічно для повзучості:

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^K \Delta\sigma(s_i) \cdot \Pi(t - s_i) \quad (3.42)$$

При безперервному деформуванні

$$\sigma(t) = \int_0^t R(t-s) d\varepsilon(s). \quad (3.43)$$

При безперервному навантаженні

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \Pi(t-s) d\sigma(s) \quad (3.44)$$

Суть функцій впливу $\Gamma(t)$, $K(t)$, $R(t)$ і $\Pi(t)$ з'ясуємо при деталь-
ному розгляді процесів повзучості і релаксації.

3.2.2. РІВНЯННЯ ПОВЗУЧОСТІ ТА РЕЛАКСАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ

Повзучість при одновісному навантаженні

Зазвичай функції впливу визначаються при випробуваннях на повзу-
чість при $\sigma_K = \text{const}$ (рис. 3.22) :

$$\sigma(t) = \sigma_K \cdot h(t), \quad (3.45)$$

$h(t)$ – функція Хевісайда:

$h(t) = 0$ при $t < 0$, $h(t) = 1$ при $t \geq 0$.

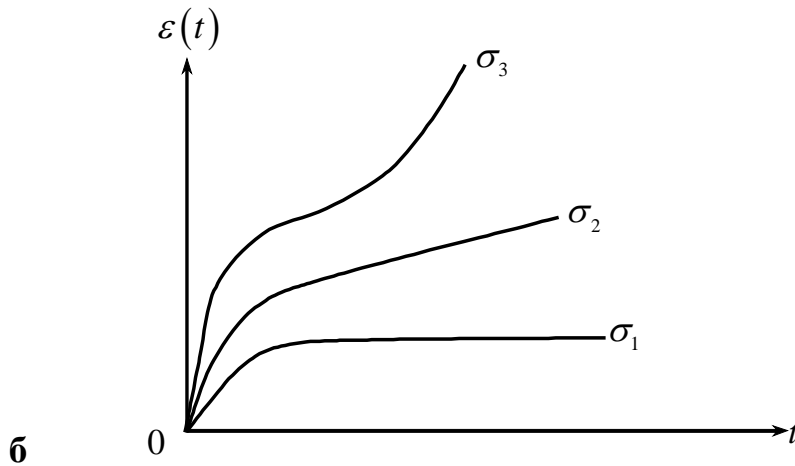


Рис. 3.22 – Режими навантаження та криві повзучості (σ_1 - обмежена повзучість, σ_2 - усталена повзучість, σ_3 - необмежена повзучість)

Експериментально показано, що при $t = 0$: $\frac{d\varepsilon}{dt} = \infty$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{\text{в.у.}} + \varepsilon_{нл} \quad (3.46)$$

Для виділення $\varepsilon_{упр}$ і $\varepsilon_{нл}$ можна розвантажити зразок і виміряти ці деформації.

Для визначення $\varepsilon_{\text{в.у.}}$ необхідно побудувати сімейство кривих при різних σ і T .

Скористаємося рівнянням (3.38) при $\sigma(t) = \sigma_K$:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_K}{E_0} \left[1 + \int_0^t K(s) ds \right] \quad (3.47)$$

Після диференціювання обох частин (3.47) по t :

$$K(t) = \frac{E_0}{\sigma_K} \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (3.48)$$

Таким чином, функція впливу $K(t)$ пропорційна швидкості повзучості і називається функцією швидкості повзучості.

1). При $t = 0$ $\frac{d\varepsilon}{dt} \rightarrow \infty$, тобто $K(t)$ має бути сингулярною ($K(0) = \infty$)

2). Інтеграл від $K(t)$ має бути кінцевою величиною (обмежена повзучість).

Можна показати, що при $\sigma_K = const$ з рівняння (3.44) отримаємо:

$$\varepsilon(t) = \sigma_K \cdot \Pi(t), \quad (3.49)$$

$\Pi(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_K}$ - функція повзучості або податливість матеріалу.

У відповідності з (3.48) і (3.49):

$$K = E_0 \frac{d\Pi}{dt} \quad (3.50)$$

Всі наведені вище рівняння справедливі для лінійної області. Це означає, що в області лінійних деформацій функція повзучості не залежить від σ_K при даному t (рис. 4.6).

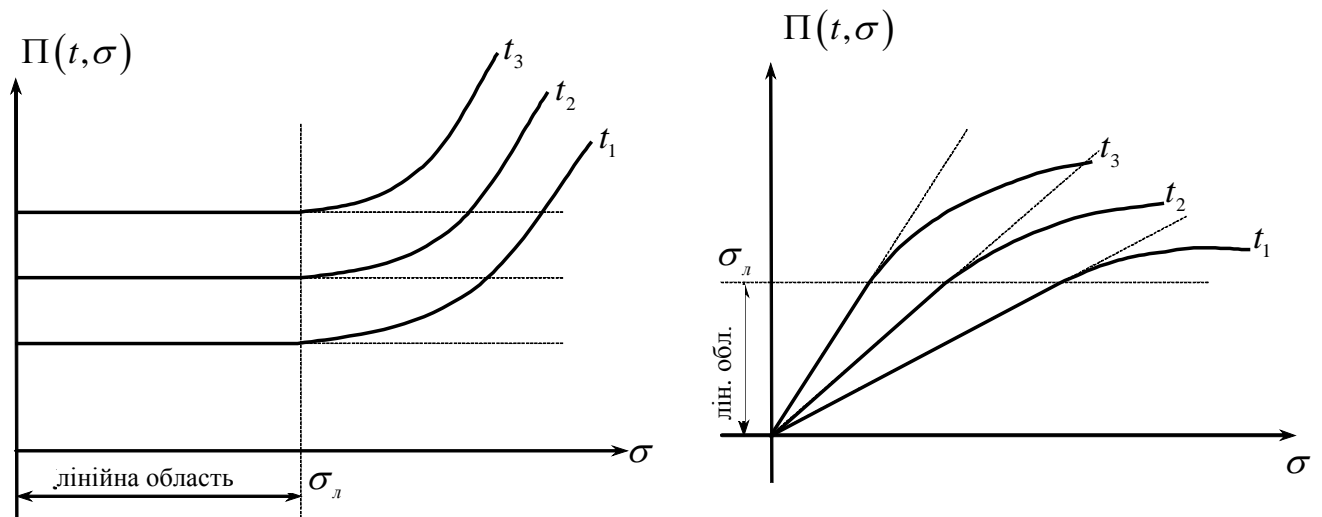


Рис. 3.23 – Графічна інтерпретація визначення областей лінійності в'язко-пружних властивостей полімерного матеріалу

Для областей, що виходять за область лінійної повзучості, необхідно застосувати варіанти нелінійної теорії.

Повзучість при складному напружено-деформованому стані

Рівняння повзучості для складного напруженого стану, поділяються на рівняння зсуву і об'ємного деформування.

Рівняння для зсуву:

$$e_{ij}(t) = \frac{1}{2G} S_{ij}(t) + \frac{1}{2G_0} \int_0^t K_C(t-s) \cdot S_{ij}(s) ds, \quad (3.51)$$

$e_{ij}(t)$ - девіатор тензора деформацій;

$S_{ij}(t)$ - девіатор тензора напружень;

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

$K_C(t-s)$ - функція швидкості зсувної повзучості.

Для об'ємної деформації:

$$\theta(t) = \frac{1}{B} \sigma(t) + \frac{1}{B_0} \int_0^t K_V(t-s) \cdot \sigma(s) ds, \quad (3.52)$$

$\theta(t)$ - об'ємна деформація;

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

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

$K_V(t-s)$ - функція швидкості об'ємної повзучості.

В іншій формі, за аналогією з (3.43) та (3.44):

$$e_{ij} = \int_0^t \Pi_C(t-s) \cdot dS_{ij}(s); \quad (3.53)$$

$$\theta(t) = \int_0^t \Pi_V(t-s) \cdot d\sigma(s), \quad (3.54)$$

$\Pi_C(t-s)$ - функція зсувної повзучості;

$\Pi_V(t-s)$ - функція об'ємної повзучості.

Визначення функцій Π_C , Π_V , K_C , K_V .

Експериментально вимірюємо деформації при $S_{ij}(t) = S_{ij(K)} \cdot h(t)$ та

$$\sigma(t) = \sigma_K \cdot h(t)$$

$$\Pi_C(t) = \frac{e_{ij}(t)}{S_{ij(K)}}; \quad \Pi_V(t) = \frac{\theta(t)}{\sigma_K}; \quad (3.55)$$

Зв'язок між K та Π :

$$K_C = 2G \frac{d\Pi_C}{dt}; \quad K_V = B \frac{d\Pi_V}{dt}; \quad (3.56)$$

Релаксація напружень при одновісному деформуванні

Релаксація - процес зміни σ у часі при постійній деформації.

При $\varepsilon(t) = const = \varepsilon_K$ з (4):

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon_K \left[1 - \int_0^t \Gamma(s) ds \right] \quad (3.57)$$

Після диференціювання по часу отримаємо функція швидкості релаксації:

$$\Gamma(t) = -\frac{1}{E_0 \varepsilon_K} \frac{d\sigma(t)}{dt} \quad (3.58)$$

З теорії інтегральних рівнянь Вольтера II роду виходить:

$$\Gamma(t) - K(t) = \int_0^t K(t-s) \cdot \Gamma(s) ds \quad (3.59)$$

Це дозволяє по $\Gamma(t)$ знайти $K(t)$ і навпаки.

$\Gamma(t)$ - ядро рівняння (4), а $K(t)$ - резольвента.

Можна показати з рівняння (3.43), що при $\varepsilon_K = const$

$$\sigma(t) = \varepsilon_K \cdot R(t), \quad (3.60)$$

$R(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_K} - \text{функція релаксації або модуль релаксації матеріалу.}$

1) При $t = 0$ $R(0) = \frac{\sigma(0)}{\varepsilon_K} = E_0$.

2) Оскільки при $t = 0$ $K(0) = \infty$, з (3.59) виходить: $\Gamma(0) \rightarrow \infty$

3) При $t \rightarrow \infty$ $\frac{d\sigma}{dt} \rightarrow 0$ (експеримент), отже, $\Gamma(\infty) \rightarrow 0$.

Зв'язок між Γ и R має вигляд:

$$\Gamma(t) = -\frac{1}{E_0} \frac{dR}{dt} \quad (3.61)$$

Релаксація напружень при складному напружено-деформованому стані

Рівняння релаксації напружень для складного напруженого стану:

$$S_{ij}(t) = 2G e_{ij}(t) - 2G \int_0^t \Gamma_C(t-s) \cdot e_{ij}(s) ds \quad (3.62)$$

$$\sigma(t) = B \cdot \theta(t) - B \int_0^t \Gamma_V(t-s) \cdot \theta(s) ds \quad (3.63)$$

$\Gamma_C(t-s)$ - функція швидкості зсувної релаксації

$\Gamma_V(t-s)$ - функція швидкості об'ємної релаксації

$$S_{ij}(t) = \int_0^t R_C(t-s) \cdot de_{ij}(s) \quad (3.64)$$

$$S_{ij}(t) = \int_0^t R_V(t-s) \cdot d\theta(s) \quad (3.65)$$

$R_C(t-s)$ - зсувний модуль релаксації;

$R_V(t-s)$ - об'ємний модуль релаксації.

Визначення $R_C, R_V, \Gamma_C, \Gamma_V$.

При $e_{ij} = e_{ij(k)}$ и $\theta = \theta_k$:

$$R_C(t) = \frac{S_{ij}(t)}{e_{ij(k)}}; \quad R_V(t) = \frac{\sigma(t)}{\theta_k}; \quad (3.66)$$

Зв'язок між Γ и R :

$$\Gamma_C(t) = -\frac{1}{2G} \frac{dR_C}{dt}; \quad \Gamma_V(t) = -\frac{1}{B} \frac{dR_V}{dt}; \quad (3.67)$$

При $t = 0$: $R_C(0) = 2G$; $R_V(0) = B$;

3.2.3. ВИБІР ФУНКЦІЙ ВПЛИВУ В РІВНЯННЯХ СПАДКОВОЇ В'ЯЗКО-ПРУЖНОСТІ

Основні властивості функцій впливу:

$$K(t) = E_0 \cdot \Pi'(t); \quad \Gamma(t) = -\frac{1}{E_0} R'(t)$$

$$1). t \rightarrow 0, \quad \frac{d\varepsilon}{dt} \rightarrow \infty: \quad K \rightarrow \infty$$

$$2). t \rightarrow 0, \quad \frac{d\sigma}{dt} \rightarrow \infty: \quad \Gamma \rightarrow \infty$$

$$3). t = 0 \quad \Pi \text{ и } R - \text{ обмежені } \left(\Pi(0) = \frac{\varepsilon(0)}{\sigma_K} \neq \infty, \quad \sigma_K \neq 0 \right)$$

4). Інтегралі від K і Γ в будь-яких границях обмежені.

Будь-які функції у вигляді експонент не розглядаються (похідні від $A \exp(-\beta t)$; $\sum A \exp(-\beta t)$ - не наближаються до нескінченності, тобто швидкості процесів повзучості і релаксації в момент прикладання навантаження або деформацій не задовольняють умовам 1 і 2.

Найчастіше при вирішенні задач в'язко-пружності застосовують такі функції:

Ядро Абеля:

$$\Gamma(t) = \frac{At^\alpha}{\tilde{\Gamma}(1+\alpha)} \quad \tilde{\Gamma}(z) = \int_0^\infty \zeta^{z-1} e^{-\zeta} d\zeta.$$

Ядро (резольвента) Работнова:

$$K(t) = t^\alpha \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A\beta^n t^{n(1+\alpha)}}{\tilde{\Gamma}[(n+1)(1+\alpha)]}, \quad (-1 < \alpha < 0).$$

Ядро Ржаніцина:

$$\Gamma(t) = Ae^{-\beta t} \cdot t^{\alpha-1}.$$

Ядро (резольвента) Колтунова:

$$K(t) = \frac{e^{-\beta t}}{t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[A \cdot \tilde{\Gamma}(\alpha)]^n \cdot t^{\alpha n}}{\tilde{\Gamma}(\alpha n)}, \quad (0 < \alpha < 1).$$

3.3. ПОВЗУЧІСТЬ ТА РЕЛАКСАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ ПОЛІМЕРІВ В ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛЯХ

3.3.1. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ 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 температурно-часової аналогії.

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.

Аналіз сімейства кривих деформування, отриманих при різних температурах показує, що криві $\sigma(\varepsilon)$ зі збільшенням T розташовуються нижче, а характеристики міцності зменшуються, тобто температура справляє зворотну дію в порівнянні зі швидкостями навантаження.

Це явище має прямий зв'язок з *температурно – часовою аналогією (ТЧА)*, згідно з якою між часом (швидкістю) і температурою існує така залежність:

поведінки в'язко-пружних матеріалів при великих швидкостях навантаження та високих температурах, аналогічно поведінці при малих швидкостях і низьких температурах.

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

Цей зв'язок для стаціонарних температурних полів (T не залежить від t) можна записати у вигляді:

$$\lg a_T(T) = \lg \left(\frac{t'}{t} \right), \quad (3.68)$$

де a_T - температурна функція; t - час досягнення якогось ефекту при T ; t' - час досягнення такого ж ефекту при деякій температурі T_0 (температура зведення).

Рівність (3.68) означає, що експериментальні криві при постійній швидкості навантаження $\frac{d\sigma}{dt} = const$ і різних температурах T , *можуть бути зміщені горизонтальним перенесенням уздовж осі логарифму часу.*

При використанні ТЧА співвідношення, отримані для ізотермічних процесів, можуть бути використані для опису неізотермічних процесів.

Приклади:

Принцип ТЧА: для досягнення якого-небудь значення функції \tilde{R} або $\tilde{\Pi}$ (рис. 3.24) необхідно при малих T зробити тривале навантаження, або при великих T - короткочасне навантаження. T і t взаємопов'язані.

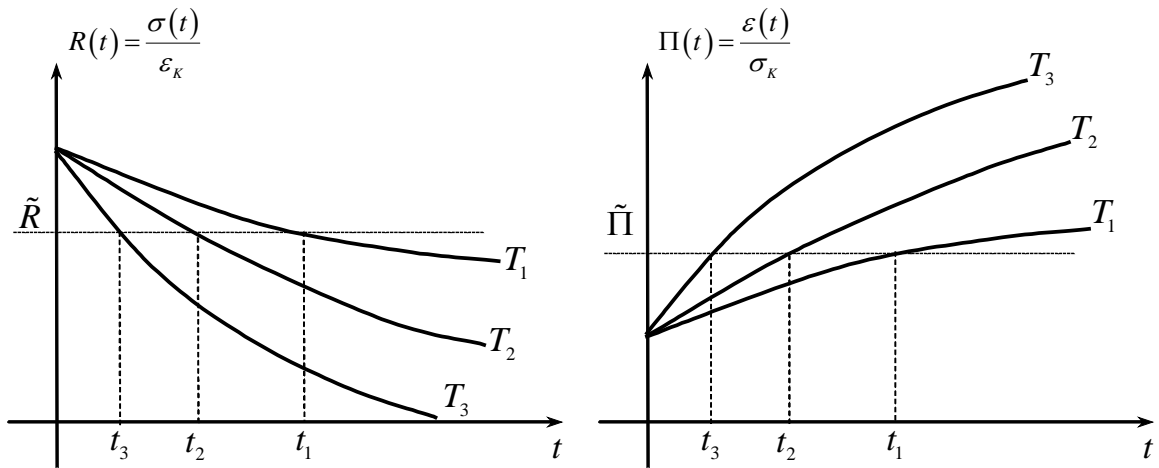


Рис. 3.24 – Вплив температури ($T_1 < T_2 < T_3$) на релаксацію напружень та повзучість полімерного матеріалу

Найбільш сильно позначається вплив T на поведінку в'язких елементів, слабо - на поведінку пружних.

Тому вважаємо, $E_m = const$, $\eta_m = \eta_m(T)$.

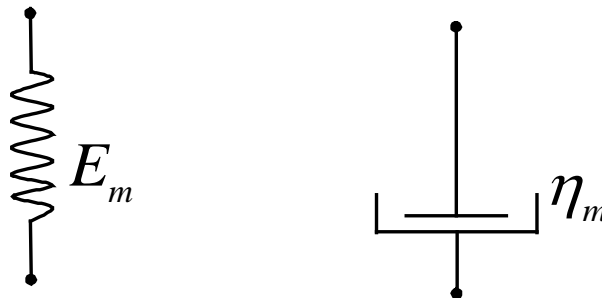


Рис. 3.25 – Пружні та в'язкі елементи, що ви користуються у механічних моделях для описання процесів повзучості та релаксації напружень в полімерах

Напівемпірична залежність $\eta(T)$ представляється формулою:

$$\eta = A \exp\left(\frac{B}{T - C}\right) \quad (3.69)$$

Тут A, B, C - константи, різні для різних речовин, причому $T > C$. Припускаємо, що в'язкі елементи моделей однотипні, тобто коефіцієнт в'язкості η_m для m -го елемента:

$$\eta_m(T) = \eta_m^0(a_T(T)) \quad (3.70)$$

де a_T - деяка функція T , однакова для всіх елементів. η_m^0 - від температури не залежить. Опір деякого елемента моделі характеризується оператором $\eta_m \frac{d}{dt}$, що діють на певну деформацію, тобто:

$$\eta_m \frac{d}{dt} = \frac{\eta_m^0}{a_T(T)} \frac{d}{dt} = \eta_m^0 \frac{d}{dt'},$$

де через t' позначений зведений час):

$$dt' = a_T(T) dt, \quad t' = \int_0^t a_T(T) dt \quad (3.71)$$

При $T = const$ $t' = a_T \cdot t$.

Розглядаючи $\eta_m^0 \frac{d}{dt}$ при $a_T = const = 1$ як ізотермічний оператор в'язкості m -го елемента, з (3.71) заключаємо, що $\eta_m^0 \frac{d}{dt'}$ буде відповідно екзотермічним оператором.

Формальна відмінність цих операторів тільки в позначенні t и t' .

Отже всі отримані раніше співвідношення для ізотермічних процесів зберігаються для неізотермічних, якщо дійсний час замінити на зведений t' , обчислений за формулою (3.71).

Якщо T в кожній точці тіла різна, то і t' буде для цих точок різний.

Встановлена властивість визначає ТЧА: співвідношення між σ , ε і зведеним часом t' для ізотермічних і неізотермічних процесів навантаження тотожно збігаються; T і t мають взаємозамінний вплив на ці процеси.

У зазначені співвідношення $\sigma - \varepsilon$ входить лише комбінація « $T - t$ » у вигляді t' .

Для оцінки вкладів в t' , внесених істинним часом t і температурою T , скористаємося формулою (3.69) і порівняємо її з (3.70).

$$\frac{\eta_m^0}{a_T(T)} = A_1 \exp\left(\frac{B}{T-C}\right) \rightarrow a_T(T) = B_1 \exp\left(-\frac{B}{T-C}\right) \quad (3.72)$$

Нормуємо ці вирази так, щоб при температурі зведення $T = T_0$ $(a_T)_{T=T_0} = 1$. Підставляємо T_0 і $a_T = 1$ в (3.72) та після нескладних перетворень одержуємо:

$$\ln a_T(T) = \frac{a(T-T_0)}{b+(T-T_0)} \quad (3.73)$$

$$\text{тут } a = \frac{B}{T_0 - C}; \quad b = T_0 - C.$$

Формула (3.73) носить назву Вільямса-Ландела-Фері (ВЛФ).

Для багатьох полімерів ця залежність може бути апроксимована рівнянням:

$$\ln a_T = c \frac{T - T_0}{T} \quad (3.74)$$

Матеріали, для яких виконується принципи ТЧА, називаються ***терморологічно простими***.

Слід відмітити, що даний метод придатний тільки в діапазоні температур, в якому в матеріалі не відбувається структурних перетворень (для конструкційних полімерів це діапазон від температури крижкості до температури склування).

3.3.2. ПРАКТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ФУНКЦІЇ ВЛФ ТА ПОБУДОВА УЗАГАЛЬНЕНИХ КРИВИХ

Визначення коефіцієнтів функції ВЛФ

При $T = const$, $t' = a_T \cdot t$. Звідси $\ln t' = \ln t + \ln a_T$.

Отже $\ln a_T = \ln t' - \ln t$, або це відстань між кривими, отриманими при $T = T_0$, і кривими при будь-якій температурі T (рис. 3.26).

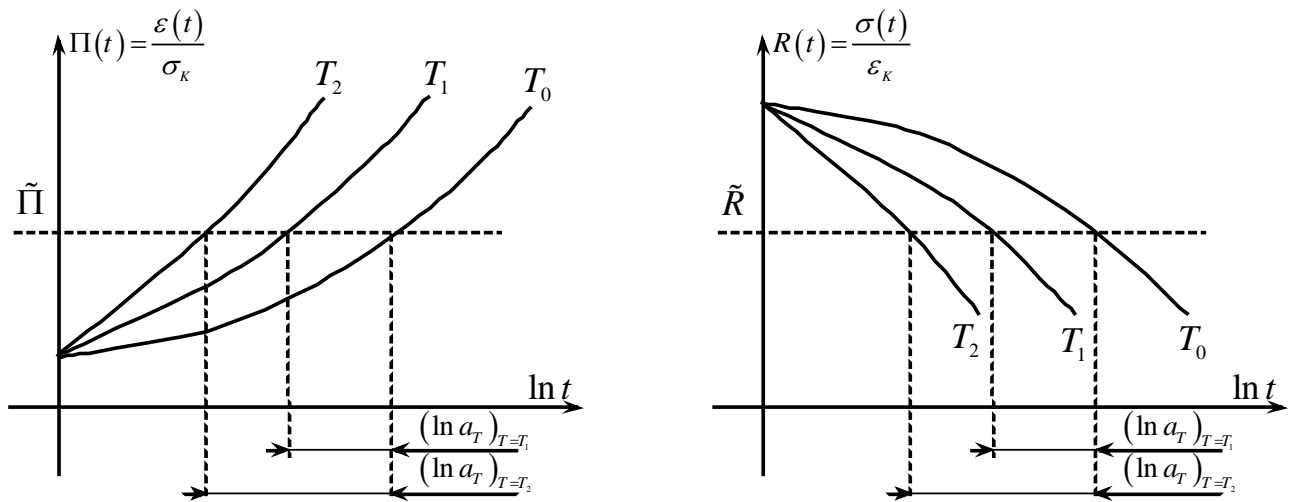


Рис. 3.26 – Схема визначення значень функцій ВЛФ за відстанями між кривими повзучості та релаксації напружень

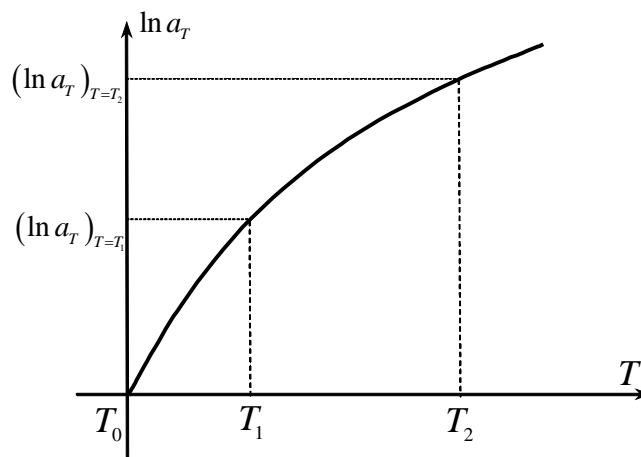


Рис. 3.27 – Схема апроксимації залежності функції ВЛФ від температури

За отриманими значеннями будується залежність між $\ln a_T$ та T (рис. 3.27).

Коефіцієнти a і b з (3.73), підбираються так, що б ці залежності найкращим чином описували криву $\ln a_T \sim T$.

Побудова узагальнених кривих повзучості та релаксації напружень

Для перевірки правильності визначення коефіцієнтів функції ВЛФ будемо криву повзучості у системі координат «функція повзучості – зведений час» або криву релаксації напружень у системі координат «функція релаксації - зведений час» (рис. 3.28).

Для цього всі точки на експериментальних кривих переміщуємо вправо на величину натурального логарифму функції ВЛФ, обчисленої для відповідної температури.

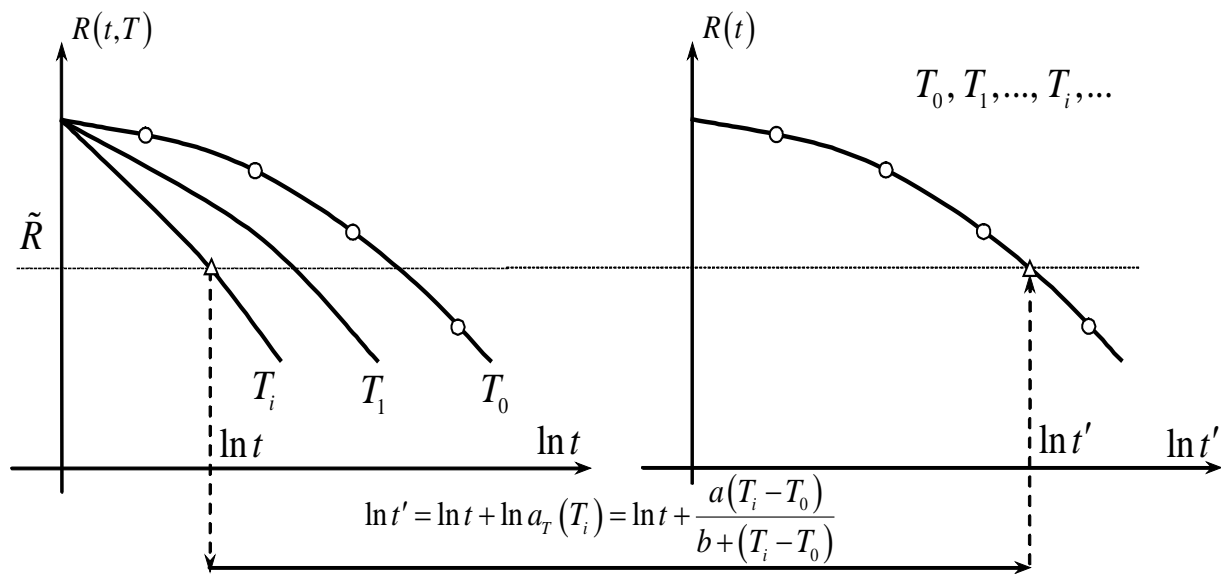


Рис. 3.28 – Схема побудови узагальненої кривої релаксації напружень шляхом зміщення експериментальних точок на величину логарифма функції ВЛФ

Щільне групування експериментальних точок навколо єдиної кривої, яку називають узагальненою кривою, показує правильність проведених обчислень та приналежність дослідженого матеріалу до терморологічно простого.

Надалі параметри в'язко-пружних моделей підбираємо саме для узагальнених кривих. Цім підвищуємо точність апроксимації, оскільки одразу враховуються результати всіх експериментів, проведених при різних температурах.

3.3.3. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ТЧА

1. Прогнозування деформацій ПМ на тривалий час за результатами короткочасних випробувань

Застосовуючи дані, отримані при різних температурах, можна зробити прогнозування, наприклад, деформацій повзучості на більший час, ніж час проведення експериментів. Короткий час, яким обмежений експеримент, умовно називають «експериментальне вікно» (**рис. 3.29**).

Схема прогнозування наведена на **рис. 3.29**. Всі точки на кривих повзучості, отриманих при підвищених температурах, переносять на узагальнену криву та за цієї кривою здійснюють прогноз повзучості на декілька місяців або років.

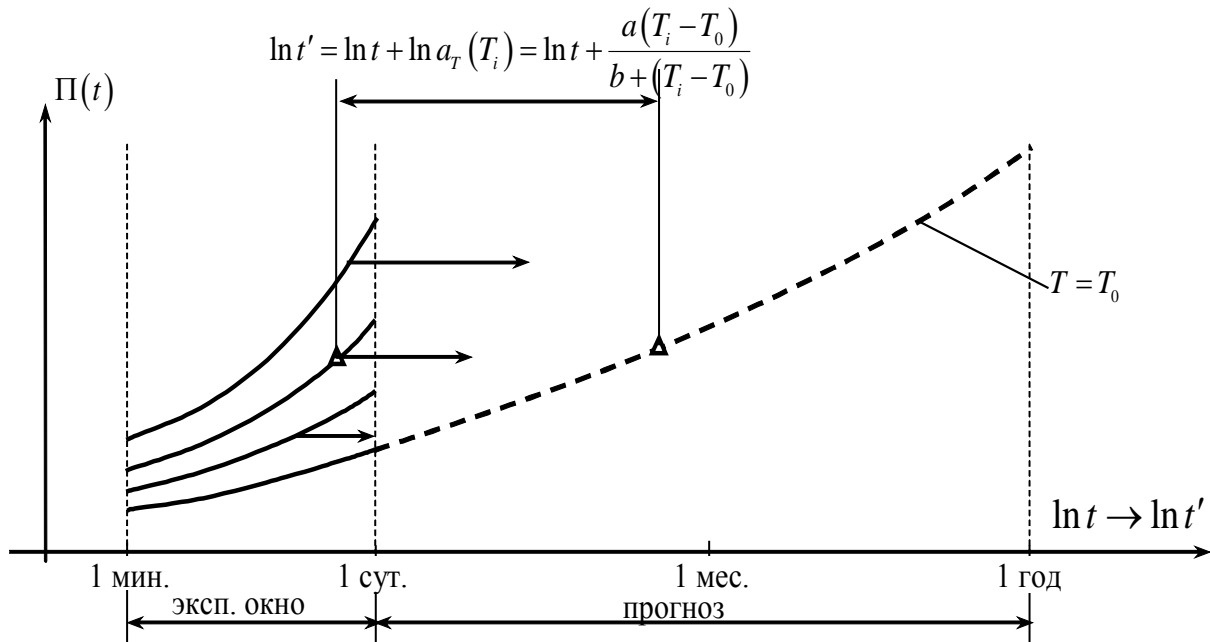


Рис. 3.29 – Схема прогнозування деформацій повзучості за результатами короточасних випробувань при підвищених температурах

2. Застосування рівнянь в'язко-пружності, отриманих для $T = T_0 = const$, до вирішення задач при $T \neq const$.

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

Для термореологічно простих матеріалів мають місце такі залежності:

$$I(t, T) \equiv I(t') \Big|_{T=T_0}, \quad (3.75)$$

$$E(t, T) \equiv E(t') \Big|_{T=T_0}, \quad (3.76)$$

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.

Всі рівняння в'язко-пружності зберігаються, якщо $t \rightarrow t'$.

Таким чином, зв'язок між напруженнями, деформаціями, часом та температурою на основі принципу ГЧА можна отримати із співвідношень (3.37) – (3.40), (3.43), (3.44), (3.51) – (3.54), (3.62) – (3.65) заміною дійсного часу t на зведений час t' (та S на S').

Наприклад, рівняння (3.37) записується так:

$$\sigma(t, T) \equiv \sigma(t') = E_0 \varepsilon(t') + E_0 \int_0^{t'} \Gamma(t' - s') \cdot \varepsilon(s') ds' , \quad (3.77)$$

а рівняння (3.38) буде мати такий вигляд:

$$\varepsilon(t, T) \equiv \varepsilon(t') = \frac{1}{E_0} \sigma(t') + \frac{1}{E_0} \int_0^{t'} K(t' - s') \cdot \sigma(s') ds' . \quad (3.78)$$

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 (3.31) при постійній температурі набуває вигляду:

$$\varepsilon(t) = \sigma_K \cdot I_0 + \sigma_K \sum_{i=1}^n I_i [1 - \exp(-t \cdot a_T(T) / (\tau_i))] . \quad (3.79)$$

РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1. РУЙНУВАННЯ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ ПОЛІМЕРІВ

Встановлено, що на процеси руйнування ПМ впливають такі чинники:

- температура (знижує міцність зв'язків усередині макромолекул, міцність міжмолекулярних зв'язків, а також міцність зв'язків між структурними елементами кристалічної фази);
- тривалість перебування під навантаженням (поступове накопичення пошкоджень або часова залежність міцності);
- характер напруженого стану (співвідношення між головними напруженнями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$);
- швидкість деформування або навантаження (пошкодження в матеріалі можуть виникати вже в процесі деформування, що призводить до зниження міцності);
- закони навантаження або деформування (статичний або циклічний, параметри циклу);
- розміри деталей (масштабний ефект, пов'язаний зі збільшенням сумарного числа пошкоджень при збільшенні розмірів об'єкта);
- стан поверхні (груба обробка призводить до виникнення концентраторів напружень на поверхні деталі);
- кліматичний вплив (тривале перебування при підвищеній температурі, вологості, під впливом озону повітря або хімічно активних середовищ призводить до деструкції макромолекул);
- інші чинники.

4.1.1. ЧАСОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЦНОСТІ ПОЛІМЕРІВ, РІВНЯННЯ ЖУРКОВА

Експериментально показано, що міцність матеріалу істотно залежить від часу перебування під навантаженням. Це явище (часова залежність міцності при статичному навантаженні) отримало назву *статичної втоми*.

Час від моменту прикладання навантаження до моменту руйнування називається *довговічністю* матеріалу.

За допомогою експериментальних досліджень С.Н. Журковим з співробітниками одержані залежності часу до руйнування (довговічність τ_p) від діючого навантаження для широкого ряду матеріалів (метали, скло, кристали, полімерні і композиційні матеріали).

Змінюючи рівні напружень в зразках, варіювали значення довговічності τ_p від 10^{-3} с (≈ 1 мс) до 10^7 с (кілька місяців).

У широкому діапазоні напружень залежність $\ln \tau_p$ від σ носить лінійний характер (рис. 4.1), тобто:

$$\tau_p = A \cdot \exp(-\alpha \cdot \sigma) \quad (4.1)$$

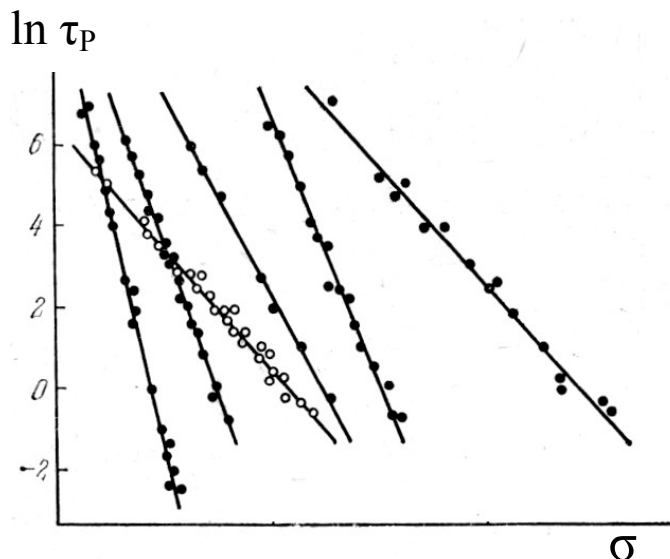


Рис. 4.1 -- Залежності довговічності від діючих напружень для різних полімерних матеріалів

На підставі численних експериментів, проведених при різних температурах, цим же автором запропонована більш загальна залежність довговічності (рівняння Журкова):

$$\tau_p = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{k \cdot T}\right) \quad (4.2)$$

Тут: U_0 - енергія активації руйнування в разі відсутності механічної напруги (практично не залежить від стану полімеру і фактично є константою матеріалу);

T - абсолютна температура в $^{\circ}\text{K}$;

τ_0 - параметр, який практично не залежить від типу полімеру і становить від 10^{-12} до 10^{-13} с, що збігається з періодом коливань атомів речовини;

γ - структурно – чутливий коефіцієнт, названий так тому, що він виявився сильно залежним від структури полімеру (ступінь кристалічності, пластифікація, орієнтація макромолекул, молекулярна вага, інші характеристики ПМ);

k - постійна Больцмана.

Процес руйнування матеріалу за Журковим слід розглядати як термічну деструкцію (розрив молекулярних ланцюгів), прискорену механічними напруженнями.

Логарифмуючи (4.2), отримуємо, що

1. при $T = \text{Const}$ залежність між $\ln \tau_p$ і діючим напруженням лінійна;

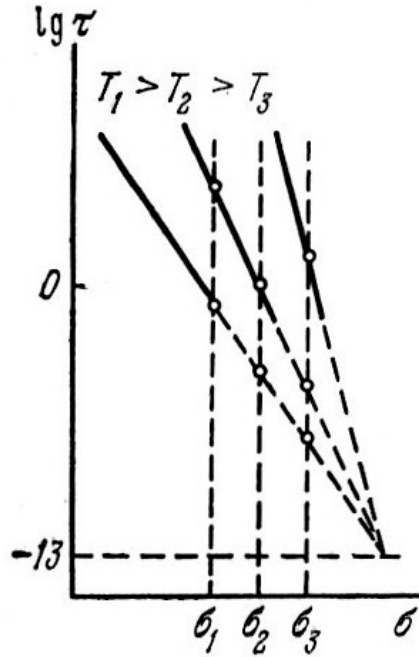


Рис. 4.2 -- Залежність довговічності від діючого навантаження в матеріалі при різних температурах: суцільні лінії - експеримент, пунктир - розрахунок за рівнянням (4.2)

2. при $\sigma = \text{const}$ має місце лінійна залежність між $\ln \tau_p$ та $1/T$

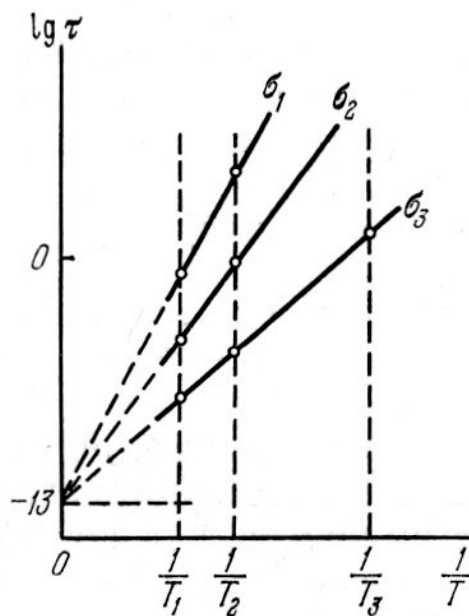


Рис. 4.3 -- Залежність довговічності від величини, оберненої до температури: $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$, суцільні лінії - експеримент, пунктир - розрахунок за рівнянням (4.2)

4.1.2. ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ НА МІЦНІСТЬ ПОЛІМЕРІВ

Механічні властивості полімерних матеріалів залежать від швидкості навантаження або деформування. Враховуючи, що елементи конструкцій, виготовлені з полімерів, піддаються механічним навантаженням, швидкість яких змінюються в широких межах, вивчення механічних характеристик цих матеріалів представляє значний практичний інтерес.

Як приклад, на рис. 4.4, 4.5 зображені експериментальні залежності границі міцності та максимального видовження при розриві від швидкості деформування різних марок поліетилентерефталату. Дослідження проведені при різних температурах в діапазоні від 20 до 80⁰С.

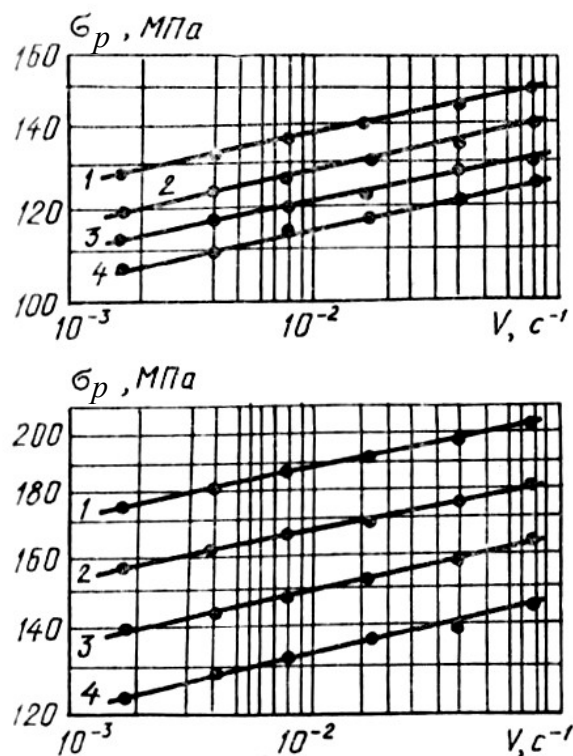


Рис. 4.4 -- Залежності границі міцності при розтязі ПЕТФ 4406 (верхні графіки) та ПЕТФ РЕ-31 (нижні графіки) від швидкості деформування при температурах 20⁰С (1), 40 (2), 60 (3) та 80⁰С (4)

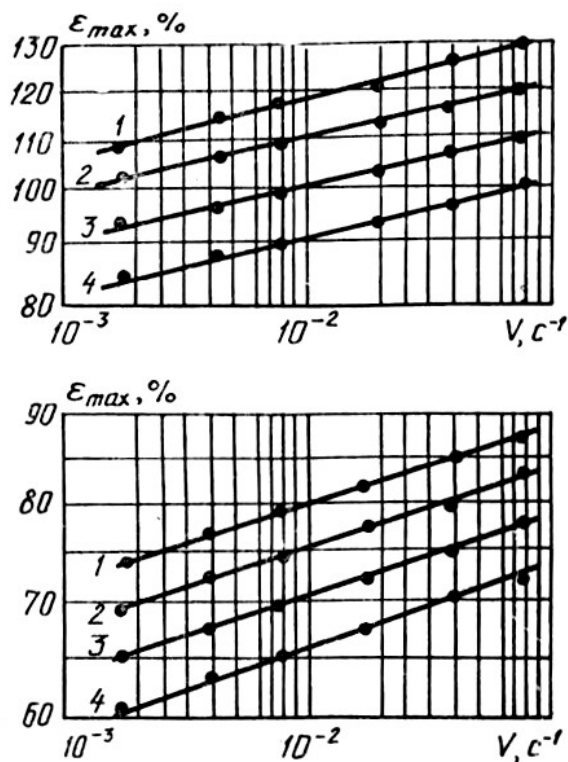


Рис. 4.5 -- Залежності границі міцності при розтязі ПЕТФ 4406 (верхні графіки) та ПЕТФ PE-31 (нижні графіки) від швидкості деформування при температурах 20⁰С (1), 40 (2), 60 (3) та 80⁰С (4)

Встановлено, що збільшення швидкості деформування в 50 разів приводить до збільшення σ_p та ϵ_{max} в середньому на 15 ... 18 %.

Зміна короточасної міцності полімерів при зміні швидкості деформування пов'язана з часовою залежністю властивостей полімерів. Зменшення швидкості деформування при випробуваннях на розрив аналогічне збільшенню тривалості дії навантаження, що зменшує міцність матеріалу.

Залежності міцності і деформаційних характеристик від швидкості деформування, побудовані в подвійних логарифмічних координатах, в досліджених діапазонах швидкостей деформування та температур практично лінійні (рис. 4.4, 4.5).

Отже, зазначені залежності можуть бути представлені у вигляді

$$\sigma_p = a \cdot V^n ; \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{\max} = b \cdot V^m , \quad (4.4)$$

де V – швидкість деформування, c^{-1} ;

a, b, n, m - коефіцієнти, що залежать від типу матеріалу і температури.

Встановлено, що для поліетилентерефталату коефіцієнти n та m практично не залежать від типу матеріалу та температури. Коефіцієнти a та b в дослідженому температурному діапазоні змінюються в залежності від температури практично лінійно. Це дає можливість в дослідженому температурному інтервалі оцінювати вплив швидкості деформування на міцність та максимальну деформацію за формулами:

для ПЕТФ 4406

$$\sigma_p = (173.4 - 0.47 \cdot T) V^{0.0385} ;$$

$$\varepsilon_{\max} = (101 - 0.55 \cdot T) V^{0.0450} ,$$

для ПЕТФ PE-31

$$\sigma_p = (246.3 - 1.04 \cdot T) V^{0.0385} ;$$

$$\varepsilon_{\max} = (75 - 0.27 \cdot T) V^{0.0450} .$$

В цих формулах температура вимірюється в градусах Цельсія, границя міцності - в мегапаскалях, максимальне видовження - у відсотках.

Встановлено, що із збільшенням швидкості деформування діаграми деформування розташовуються вище по осі «навантаження». Проте, в досліджених діапазонах швидкостей збільшення напруження при фіксованому значенні деформації не перевищує 5 % і може не враховуватися.

Границя пропорційності, границя текучості та відповідні деформації змінюються несуттєво.

4.1.3. КРИТЕРІЙ БЕЙЛІ ТА ЙОГО ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Розглянемо докладніше дію змінних навантажень. Нехай напруження σ_k діє протягом часу Δt_1 . Внаслідок незворотності процесів руйнування загальна довговічність за Δt_1 зменшується. Під довговічністю $\tau_p(\sigma_k)$ розуміємо час, що минув від моменту прикладення напруження $\sigma_k = \text{const}$ до моменту руйнування матеріалу. При подальшій дії напруження σ_k протягом часу Δt_2 довговічність ще зменшується і т.д.

Можна прийняти відносне зменшення довговічності за час Δt_k як $\Delta t_k / \tau_p(\sigma_k)$. Руйнування настане тоді, коли відносне зменшення довговічності досягне одиниці, тобто коли Δt_k дорівнюватиме $\tau_p(\sigma_k)$. Це ілюструє рис. 4.6.

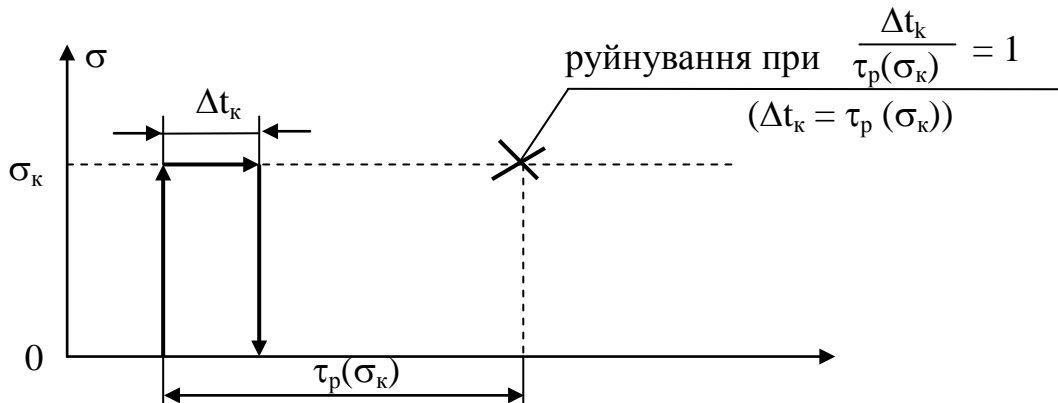


Рис. 4.6 -- Програма однократного навантаження зразка.

Якщо зразок піддали в довільному порядку дії напружень σ_i (рис. 4.7), кожному з яких відповідає довговічність $\tau_p(\sigma_i)$, а час дії напруження Δt_i , то руйнування відбудеться за умови:

$$\sum_{i=1}^N \frac{\Delta t_i}{\tau_p(\sigma_i)} = 1, \quad (4.5)$$

де N - число окремих впливів напруги до руйнування.

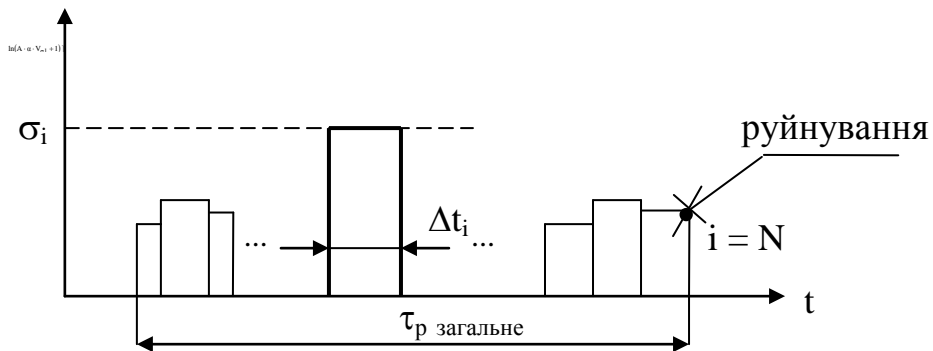


Рис. 4.7 -- Програма ступінчастого навантаження зразка.

При безперервній зміні σ (рис. 4.8) підсумовування замінимо інтегруванням

$$\int_0^{\tau_p'} \frac{dt}{\tau_p[\sigma(t)]} = 1 \quad (4.6)$$

де τ_p' - час з моменту навантаження зразка до його руйнування.

Інтеграл (4.6) називається критерієм Бейлі.

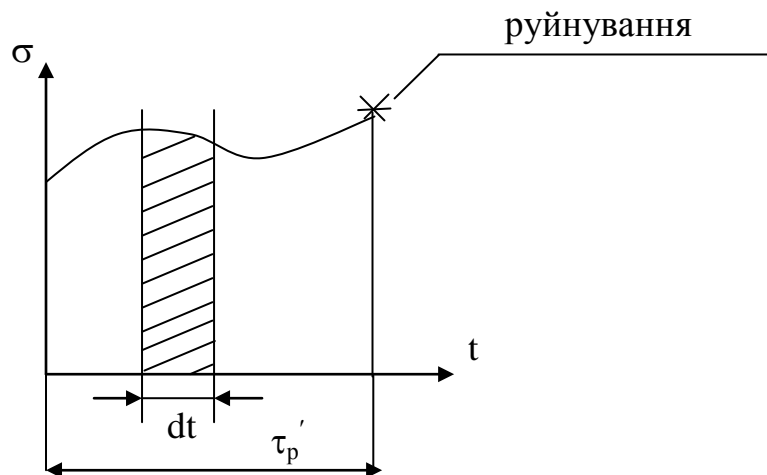


Рис. 4.8 -- Програма безперервного навантаження зразка

Приклад застосування критерію Бейлі

Задача: встановити зв'язок між міцністю матеріалу при навантаженні з постійною швидкістю збільшення навантаження і параметрами довговічності.

Нехай закон зміни напружень (рис. 4.9):

$$\sigma(t) = V_{\sigma} \cdot t,$$

де V_{σ} - швидкість навантаження (МПа / хв).

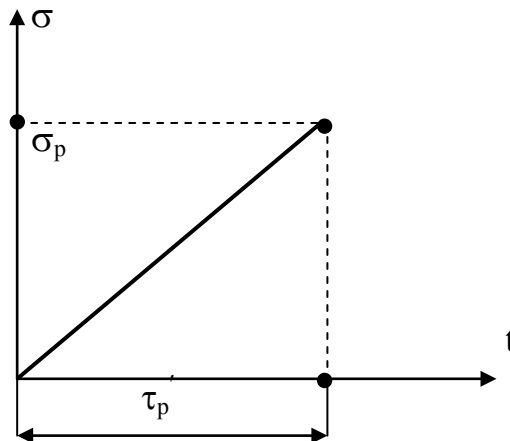


Рис. 4.9 -- Задана програма навантаження

Застосовуємо емпіричну формулу (4.1)

З (4.1) випливає, що:

$$\tau_p = A \cdot \exp(-\alpha \cdot V_{\sigma} \cdot t), \quad (4.7)$$

де A і α - коефіцієнти, що характеризують матеріал.

Ці коефіцієнти можна визначити експериментально, побудувавши залежність $\ln \tau_p$ от σ (рис. 4.10)

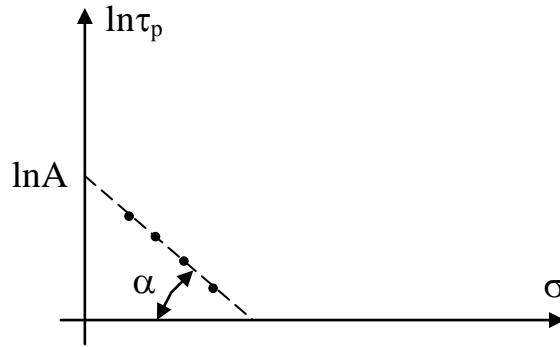


Рис. 4.10 -- Визначення коефіцієнтів A і α

Продовжуючи лінійний графік $\ln \tau_p(\sigma)$ до перетину з віссю ординат, отримуємо

$$\ln A = \ln \tau_p \Big|_{\sigma=0}.$$

Логарифмуємо (4.1):

$$\ln \tau_p = \ln A - \alpha \sigma.$$

Звідси виходить, що

$$\alpha = \frac{\ln A - \ln \tau_p}{\sigma}, \quad \alpha = \operatorname{tg} \varphi.$$

Застосовуємо критерій Бейлі (4.6). Підставляємо (4.7) в (4.6):

$$\int_0^{\tau_p'} \frac{dt}{A \cdot \exp(-\alpha \cdot V_\sigma \cdot t)} = 1. \quad (4.8)$$

Інтеграл (4.8) можна розглядати як умову руйнування.

Перетворимо (4.8):

$$\frac{1}{A} \int_0^{\tau_p'} \exp(\alpha \cdot V_\sigma \cdot t) dt = \frac{1}{A \cdot \alpha \cdot V_\sigma} \exp(\alpha \cdot V_\sigma \cdot t) \Big|_0^{\tau_p'} = \left[\frac{1}{A \cdot \alpha \cdot V_\sigma} \cdot \exp(\alpha \cdot V_\sigma \cdot \tau_p') - \frac{1}{A \cdot \alpha \cdot V_\sigma} \right] = 1.$$

Звідси

$$\exp(\alpha \cdot V_\sigma \cdot \tau_p') - 1 = A \cdot \alpha \cdot V_\sigma$$

Враховуємо, що $V_{\sigma} \cdot \tau_p' = \sigma_p$ (див. рис. 4.9)

Таким чином,

$$\exp(\alpha \cdot \sigma_p) - 1 = A \cdot \alpha \cdot V_{\sigma}. \quad (4.9)$$

Логарифмуємо (4.9):

$$\alpha \cdot \sigma_p = \ln(A \cdot \alpha \cdot V_{\sigma} + 1),$$

остаточно:

$$\exp(\alpha \cdot \sigma_p) - 1 = A \cdot \alpha \cdot V_{\sigma}. \quad (4.10)$$

Отриманий вираз пов'язує тривалу міцність матеріалу при дії постійного навантаження σ і міцність цього матеріалу при постійному зростанні навантаження зі швидкістю V_{σ} .

Зворотна задача:

Випробувавши зразки матеріалу при навантаженні з двома постійними швидкостями $V_{\sigma 1}$ и $V_{\sigma 2}$, отримаємо два значення межі міцності матеріалу σ_{p1} і σ_{p2} .

Таким чином з (4.10), одержуємо систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{p1} &= \frac{\ln(A \cdot \alpha \cdot V_{\sigma 1} + 1)}{\alpha} \\ \sigma_{p2} &= \frac{\ln(A \cdot \alpha \cdot V_{\sigma 2} + 1)}{\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

З (4.11) легко визначити параметри тривалої міцності матеріалу α і A та для визначення довговічності при заданому σ використовувати рівняння (4.1).

4.1.4. ДОВГОВІЧНІСТЬ ПРИ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Все сказане вище відноситься до квазістатичного нециклічного експериментального навантаження. Експериментально показано, що довговічність при циклічних навантаженнях менша, ніж при статичних. Різниця різко збільшується при зменшенні σ , тобто зі зростанням числа циклів.

Це в ряді випадків пояснюють підвищенням T зразків при частому деформуванні за рахунок внутрішнього тертя. При цьому $\tau_p [\sigma(t)]$ зменшується.

Таким чином, використання критерію Бейлі (4.6) при циклічному деформуванні неможливе.

Втому (руйнування при циклічному деформуванні) можна оцінити шляхом врахування зміни механічних властивостей полімеру при циклічному навантаженні. При цьому змінюється значення руйнівного напруження (за рахунок накопичення пошкоджень):

$$\sigma_p^1 \geq \sigma_p^2 \geq \dots \geq \sigma_p^i \geq \dots \quad (i - \text{номер циклу}).$$

Руйнування відбудеться при

$$\sigma_p^i \leq \sigma_{\max},$$

де σ_{\max} - максимальне за цикл напруження (рис. 4.11).

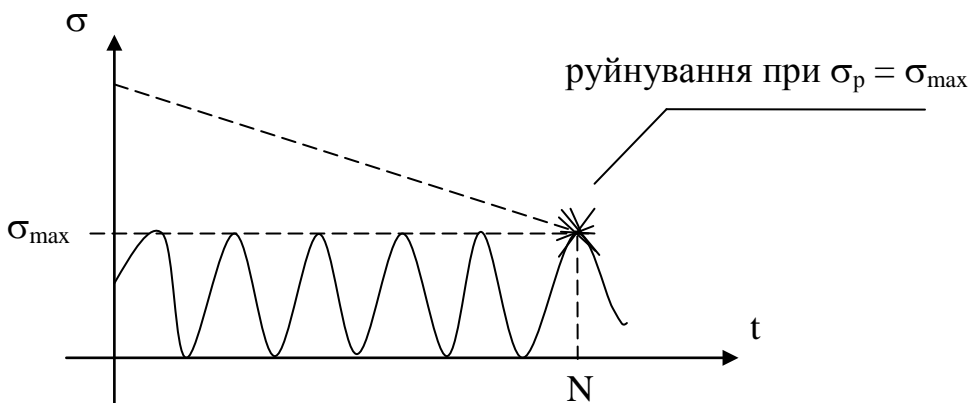


Рис. 4.11 -- Руйнування матеріалу при $\sigma_p = \sigma_{\max}$

Число циклів до руйнування визначається емпіричною формулою

$$N = \frac{1}{\Delta U} \left\{ \alpha \cdot \beta \cdot (\sigma_p^1 - \sigma_{\max}) + kT (\ln \sigma_p^1 - \ln \sigma_{\max}) \right\}$$

де ΔU - гістерезисні втрати при циклічному деформуванні;

β - коефіцієнт перенавантаження;

σ_p^1 - вихідна границя міцності матеріалу.

Добуток $\alpha \cdot \beta$ може бути визначений з температурної залежності міцності матеріалу при середній швидкості деформування.

4.2. МІЦНІСТЬ АНІЗОТРОПНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.2.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Перспективи прогресу в машинобудуванні, в основному, пов'язують з розробкою і широким застосуванням композиційних матеріалів (композитів).

Композиційні матеріали (КМ) мають комплекс властивостей і особливостей, що відрізняють їх від традиційних конструкційних матеріалів (металевих сплавів) і сукупності тих, що відкривають широкі можливості як для вдосконалення існуючих конструкцій найрізноманітнішого призначення, так і для розробки нових конструкцій і технологічних процесів.

Успішна реалізація великих потенційних можливостей, закладених в ідеї композиційного матеріалу і у властивостях його компонентів, значною мірою залежить від рівня інформованості конструктора про ці можливості, принципи конструювання і методи розрахунку.

Комбінування різних речовин залишається сьогодні одним з основних способів створення нових матеріалів.

Більшість сучасних конструкційних матеріалів є композиціями, які дозволяють технічним виробам мати певні поєднання експлуатаційних властивостей, наприклад залізобетонні конструкції, склопластикові балони тиску, автомобільні шини і тому подібне

В усіх випадках - це система різних матеріалів, кожна із складових якої має своє конкретне призначення стосовно даного готового виробу.

Ні гума, ні корд автомобільної шини не можуть виконувати своєї функції незалежно, вони використовуються спільно і повинні розглядатися як єдина композиція.

Спільна робота різнорідних матеріалів дає ефект, рівносильний створенню нового матеріалу, властивості якого і кількісно і якісно відрізняються від властивостей кожного з його складових.

Класифікація композиційних матеріалів

Композиційні матеріали є гетерофазними системами, отриманими з двох або більше компонентів зі збереженням індивідуальності кожного окремого компонента.

Для композиційних конструкційних матеріалів характерні такі ознаки:

- склад і форма компонентів матеріалу визначені заздалегідь;
- компоненти присутні в кількостях, які забезпечують задані властивості матеріалу;
- матеріал є однорідним в макро- масштабі і неоднорідним в мікро- масштабі (компоненти розрізняються за властивостями, між ними існує явна межа розділу).

У більшості випадків компоненти композиції різні за геометричною ознакою. Один з компонентів, що має безперервність по всьому об'єму, є зв'язувальною речовиною, або ***матрицею***; компонент переривчастий, розділений в об'ємі композиції, вважається таким, що зміцнює матеріал (***наповнювач*** або ***арматура***).

Матричними матеріалами можуть бути метали і їх сплави, органічні і неорганічні полімери, кераміка і інші речовини.

Посилюючими або армуючими компонентами найчастіше є тонкодисперсні порошкоподібні частки або волокнисті матеріали різної природи.

Залежно від виду армуючого компонента КМ можуть бути розділені на ***дві основні групи: дисперсно-зміцнені і волокнисті, які відрізняються структурою, механізмами утворення високої міцності.***

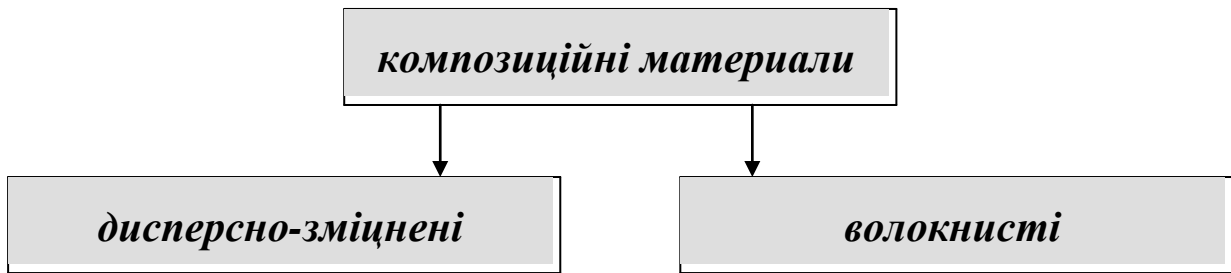


Рис. 4.12 -- Класифікація КМ за видом армуючих елементів.

Дисперсно-зміцнені композити є матеріалом, в матриці якого рівномірно розподілені дрібні дисперсні частки іншої речовини.

У таких матеріалах при навантаженні усе навантаження сприймає матриця, в якій за допомогою багатьох часток другої фази, що практично не розчиняються в ній, створюється структура, що ефективно чинить опір пластичній деформації.

Відомо, що в'язкий позбавлений крихкості матеріал перед руйнуванням зазнає значної деформації. Причому пластичні деформації в реальних кристалічних матеріалах починаються при напруженнях, менших, ніж теоретично розраховані для ідеальних матеріалів приблизно в 1000 разів.

Така низька міцність в порівнянні з теоретичною пояснюється тим, що в пластичній деформації активно беруть участь дислокації - локальні спотворення кристалічної ґратки.

При деформації завдяки дислокаціям зрушення атомів в сусіднє положення відбувається не одночасно по усій поверхні ковзання, а розтягується в часі. Таке поступове ковзання за рахунок невеликих зміщень атомів в області дислокації не вимагає значного напруження, що і проявляється при випробуваннях пластичних матеріалів. Зміцнення таких матеріалів полягає в створенні в них структури, що утруднює рух дислокацій.

Найбільш сильний опір пересуванню дислокацій створюють дисперсні частки другої фази, наприклад хімічні сполуки типу карбідів, нітридів, оксидів, боридів, що характеризуються високою міцністю і температурою плавлення.

Проблема збільшення конструкційної міцності полягає не лише в підвищенні характеристик міцності, але і в тому, як при високій міцності забезпечити високий опір крихкому руйнуванню, тобто підвищити надійність матеріалу.

У дисперсно-зміцнених матеріалах задана міцність і надійність досягаються шляхом формування певного структурного стану, при якому ефективно гальмування дислокацій поєднується з їх рівномірним розподілом в об'ємі матеріалу або (що особливо сприятливо) з певною рухливістю дислокацій, що скупчуються біля бар'єрів, для уникнення крихкого руйнування.

Зміцнення дисперсними частками дозволяє досягати $\sigma_T = 10^{-2} \cdot G$, де G - модуль зсуву, але при нагріванні до $T = (0.6 \dots 0.7) T_{пл}$ міцність різко знижується.

У волокнистих композитів матриця (найчастіше пластична) армована високоміцними волокнами, дротом, ниткоподібними кристалами.

Ідея створення волокнисто-армованих структур полягає не в тому, щоб виключити пластичну деформацію матричного матеріалу, а в тому, щоб при його деформації забезпечувалося навантаження волокон і використовувалася б їх висока міцність.

З крихких речовин матеріали з високою міцністю можна отримувати в основному у вигляді волокон. Це обумовлено тим, що волокна набагато менш чутливі до наявних в них дефектів, ніж монолітні вироби.

Через геометрію волокон тріщини в них мають бути або дуже короткими, або вони мають бути переважно паралельними поздовжній осі волокна. Отже, волокна є відносно безпечними.

Високоміцні волокна (скляні, вуглецеві, борні) є чутливими до поперечних ушкоджень, і їх не можна застосовувати в КМ без застосування середовища, яке захистило б поверхню волокон і зв'язало їх воедино. Таким середовищем може бути полімерний матеріал або пластичний метал.

Особливість волокнистої композиційної структури полягає в рівномірному розподілі високоміцних та високомодульних волокон в пластичній матриці (зміст їх, тобто об'ємна доля, може досягати 75%). У дисперсно-зміцнених матеріалах оптимальним вмістом дисперсної фази вважається 2 ... 4%.

Дисперсні частки у вказаних матеріалах, на відміну від волокон, створюють тільки «непряме» зміцнення, тобто завдяки їх присутності стабілізується структура, що формується при термічній обробці.

Інша відмінність волокнистої композиційної структури - анізотропія властивостей, обумовлена переважним розташуванням волокон в тому або іншому напрямку.

Дисперсно-зміцнені ж матеріали мають однакові властивості у всіх напрямках, оскільки дисперсні частки, що зміцнюють матеріал, мають переважно круглу форму.

Компоненти волокнистих композитів.

У волокнистих композитах ***високоміцні волокна сприймають основні напруження***, що виникають в композиції при дії зовнішніх навантажень, і забезпечують жорсткість і міцність композиції у напрямку орієнтації волокон.

Податлива матриця, що заповнює міжволоконний простір, *забезпечує спільну роботу окремих волокон* за рахунок власної жорсткості і взаємодії, існуючої на межі розділу матриця - волокно.

Отже, механічні властивості композиту визначаються трьома основними параметрами: *високою міцністю армуючих волокон, жорсткістю матриці і міцністю зв'язку на межі «матриця - волокно»*.

Співвідношення цих параметрів характеризують увесь комплекс механічних властивостей матеріалу і механізм його руйнування.

Працездатність композиту забезпечується як правильним вибором початкових компонентів, так і раціональною технологією виробництва, що формує міцний зв'язок між компонентами при збереженні первинних властивостей.

Армуючі волокна, вживані в конструкційних композитах, повинні задовольняти комплексу експлуатаційних і технологічних вимог.

До перших відносяться *вимоги до міцності, жорсткості, густини, стабільності властивостей в певному температурному інтервалі та хімічній стійкості*.

Теоретична границя міцності матеріалів σ_m зростає зі збільшенням модуля пружності E і поверхневої енергії γ речовини і падає зі збільшенням відстані між сусідніми атомними площинами α_0 :

$$\sigma_m = (\gamma \cdot E / \alpha_0)^{1/2}.$$

Отже, високоміцні тверді тіла повинні мати високі модулі пружності і поверхневу енергію і якомога більшу кількість атомів в одиниці об'єму.

Цим вимогам задовольняють *берилій, бор, вуглець, азот, кисень, алюміній і кремній*.

Найміцніші матеріали завжди містять один з цих елементів і часто складаються тільки з елементів вказаного ряду.

При створенні волокнистих композитів застосовуються високоміцні *скляні, вуглецеві, борні і органічні волокна, металеві дроти, а також волокна і ниткоподібні кристали ряду карбідів, оксидів, нітриду* та інших з'єднань.

Армуючі компоненти в композитах застосовуються у вигляді *моноволокон, ниток, дротів, джгутів, сіток, тканин, стрічок, полотен*.

Технологічність волокон визначає можливість створення високопродуктивного процесу виготовлення виробів на їх основі.

Важливою вимогою є також сумісність волокон з матеріалом матриці, тобто можливість досягнення міцного зв'язку волокно - матриця за умов, що забезпечують збереження початкових значень механічних властивостей компонентів.

Матеріали для матриць

У композитах важливим елементом є матриця, яка забезпечує монолітність композиту, фіксує форму виробу і взаємне розташування армуючих волокон, розподіляє діюче напруження за об'ємом матеріалу, забезпечуючи рівномірне навантаження на волокна і її перерозподіл при руйнуванні частини волокон.

Матеріал матриці визначає метод виготовлення виробів з композитів, можливість виготовлення конструкцій заданих габаритів і форми, а також параметри технологічних процесів і тому подібне

Таким чином, вимоги, що пред'являються до матриць, можна розділити на експлуатаційні і технологічні.

До перших відносяться вимоги, пов'язані з механічними і фізико-хімічними властивостями матеріалу матриці, які забезпечують працездатність композиції при дії різних експлуатаційних чинників.

Механічні властивості матриці мають забезпечити спільну роботу армуючих волокон при різних видах навантажень.

Характеристики міцності матеріалу матриці є визначальними

- при навантаженнях зсуву;
- при навантаженнях композиту в напрямках, відмінних від орієнтації волокон;
- при циклічних навантаженнях.

Природа матриці визначає рівень робочих температур композиту, характер зміни властивостей при дії атмосферних і інших чинників.

З підвищенням температури характеристики міцності і пружності матричних матеріалів, так само як і міцність їх з'єднань з багатьма типами волокон, знижується.

Матеріал матриці також характеризує стійкість композиту до дії зовнішнього середовища, хімічну стійкість, частково теплофізичні, електричні і інші властивості.

Технологічні вимоги до матриці визначаються процесами поєднання армуючих волокон з матрицею і остаточного формоутворення виробу.

Метою технологічних операцій є забезпечення рівномірного розподілу волокон в матриці (без торкання між собою) при заданому їх об'ємному вмісті, максимально можливе збереження міцності волокон, створення досить міцної взаємодії на межі волокно - матриця.

Таким чином, до матеріалу матриці пред'являють такі вимоги:

- хороша змочуваність волокна, можливість попереднього виготовлення напівфабрикатів з подальшим виготовленням з них виробів;
- якісне з'єднання шарів композиту в процесі формування;
- невисокі значення параметрів формоутворення (наприклад, температури, тиски) і тому подібне.

Властивості межі розділу, в першу чергу, адгезійну взаємодію волокна і матриці визначають рівень властивостей композитів і їх збереження при експлуатації.

Локальне напруження в композиті досягає максимальних значень якраз поблизу або безпосередньо на межі розділу, де зазвичай і починається руйнування матеріалу.

Межа розділу повинна мати певні властивості, щоб забезпечити ефективну передачу механічного навантаження від матриці на волокно.

Адгезійний зв'язок по межі розділу не повинен руйнуватися під дією термічної і усадкової напружень, що виникають внаслідок відмінності в температурних коефіцієнтах лінійного розширення матриці і волокна або в результаті хімічної усадки полімеру при його затвердінні.

Захист волокон від зовнішньої дії також в значно мірі визначається адгезійною взаємодією по межі розділу.

Типи волокнистих композиційних матеріалів

Розглянемо класифікацію і основні особливості композитів. Простий випадок волокнистої структури, що характеризує особливості цього класу матеріалів, є набір однорідних волокон, поміщених в пластичну матрицю.

Властивості такого композиту, утвореного однонапрямленими орієнтованими волокнами, анізотропні.

Максимальна міцність і жорсткість однонапрявленого композиту реалізуються у напрямі укладання волокон і можуть бути в загальному випадку розраховані за відомими властивостями його компонентів і їх кількісним співвідношенням.

Спрямований характер властивості композитів, природно, припускає, що разом з високими механічними характеристиками в одних напрямках вони мають низькі характеристики в інших.

Найважливіша перевага композитів - можливість створювати з них елементи конструкцій із заздалегідь заданими властивостями, що найбільш повно відповідають характеру і умовам роботи.

Різноманіття волокон і матричних матеріалів, а також схем армування, використовуваних при створенні композитів, дозволяє напрямлено регулювати міцність, жорсткість, рівень робочих температур і інші властивості шляхом підбору складу, зміни співвідношення компонентів і макроструктури композиту.

Для композиційних волокнистих матеріалів існує декілька класифікацій, в основу яких покладені різні ознаки, наприклад, матеріалознавчий (за природою компонентів) та конструктивний (за типом арматури і її орієнтації в матриці).

У рамках даних класифікацій можна виділити декілька великих груп композиційних матеріалів (рис. 4.13 та 4.14).



Рис. 4.13 -- Класифікація КМ за видами матриці

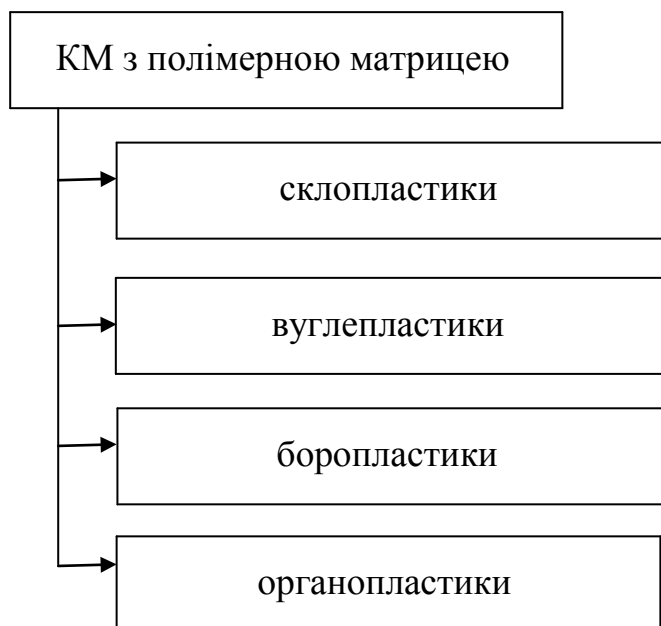


Рис. 4.14 -- Класифікація КМ з полімерною матрицею за видами армуючих волокон.

На **рис. 4.15** представлена класифікація композитів за конструктивними ознаками.

Властивості композитів залежать не лише від властивостей волокон і матриці, але і від способів армування.

Розрізняють композити:

- утворені з шарів, армованих паралельними безперервними волокнами (властивості їх в основному визначаються властивостями однонапрявленого шару);

армовані тканинами (текстоліти); з хаотичним і просторовим армуванням.

Волокнисте армування дозволяє використати нові принципи проектування і виготовлення виробів, які ґрунтуються на тому, що матеріал і виріб створюються одночасно у рамках одного і того ж технологічного процесу.

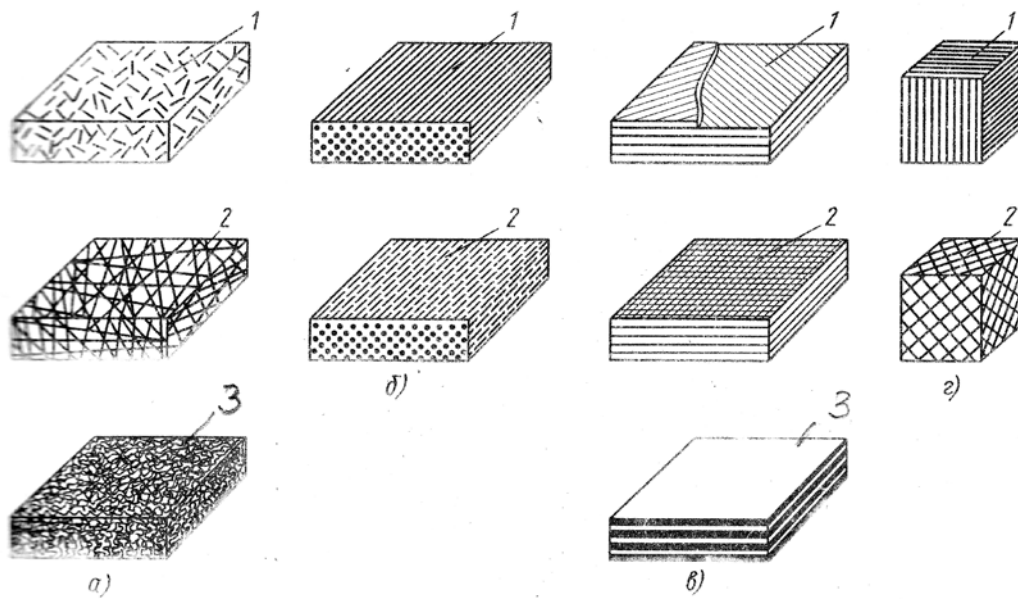


Рис. 4.15 -- Класифікація волокнистих КМ за конструктивними ознаками:

а - хаотичне армування: 1 - короткі волокна, 2 - безперервні волокна, 3 - комбіновані;

б - одновимірне армування: 1 - безперервні волокна, 2 - короткі волокна;

в - двовимірне армування: 1 - безперервні нитки, 2 - тканини, 3 - комбіновані;

г - просторове армування: 1 - три сімейства ниток, 2 - n сімейств ниток

В результаті поєднання армуючих елементів і матриці утворюється комплекс властивостей композиту, не лише ті, що відбивають початкові характеристики його компонентів, але і ті, що включають властивості, яких ізольовані компоненти не мають.

Зокрема, поява ряду нових властивостей в композитах пов'язана з гетерогенною структурою, що обумовлює наявність великої поверхні розділу між волокнами і матрицею.

Так, наявність межі розділу між армуючими елементами і матрицею істотно підвищує тріщиностійкість матеріалу.

Стійкість будь-якого твердого тіла до поширення тріщин визначається механізмом поглинання енергії у вершині зростаючої тріщини.

У композитах поперечне розтягувальне напруження на кінці зростаючої тріщини може викликати відшарування волокон від матриці, а напруження зсуву на межі розділу - поширення відшарованих ділянок уздовж волокон.

При відшаруванні витрачається енергія, оскільки волокна мають переміщатися відносно матриці.

Крім того, при подальшому навантаженні до руйнування волокна можуть розриватися в матриці далеко від площини тріщини, що поширюється.

Тому для армованих матеріалів характерні такі механізми підвищення в'язкості руйнування, яких немає у гомогенних матеріалів.

Ці механізми пов'язані з наявністю в композиційних волокнистих матеріалах великого числа поверхонь розділу, які можуть стати гальмом на шляху розвитку тріщини.

Можна в першому наближенні відмітити два явища, які сприяють інтенсивній дисипації енергії руху тріщини - витягування волокон з матриці і руйнування межі розділу між ними.

Додатковий опір поширенню тріщин, що розвинулися в матриці, створюють сили тертя між волокном, що витягається, і матрицею.

Підвищений опір розвитку руйнівних тріщин у волокнистих матеріалах обумовлений їх працездатністю при значних накопичених пошкодженнях.

Характерний для композитів високий опір втомі пов'язаний з тим, що високомодульні волокна, що сприймають основне навантаження, як крихкі

матеріали не знижують своєї несучої здатності при циклічних навантаженнях на відміну від матеріалів, що пластично деформуються.

Сучасні композити мають не лише широкий спектр фізико-механічних властивостей, але і здатні до спрямованої їх зміни, наприклад, підвищувати в'язкість руйнування, регулювати жорсткість, міцність і інші властивості.

Ці можливості розширюються при застосуванні в композитах волокон різної природи і геометрії, тобто при створенні гібридних композитів.

Крім того, для цих матеріалів характерна поява синергетичного ефекту (погодженої спільної дії декількох чинників в одному напрямку).

Причини синергетичного ефекту в гібридних композитах пов'язані із статистичною природою міцності волокон, специфічною концентрацією напружень при руйнуванні композиту позитивним початковим напруженням, яке може виникнути в процесі виготовлення виробів.

Властивості волокнистих армуючих елементів

В якості арматури в композитах застосовують волокна різної природи, представлені в різноманітних формах.

Форма волокнистих армуючих елементів визначається природою волокон, способом їх отримання і подальшою текстильною переробкою, а також процесами отримання композитів і виробів з них.

Волокнисті армуючі елементи - це, як правило, безперервні волокна, представлені у вигляді кручених і некручених ниток та джгутів, стрічок, тканин різного переплетення, а також короткі волокна у вигляді порошків, штапельних тканин, матів і так далі.

Безперервні волокна

Найчастіше для армування матриць з синтетичних смол застосовують скляні, вуглецеві, органічні (наприклад, високоміцні поліетиленові) і борні волокна. Починають застосовувати базальтові, сапфірові, волокна на основі карбиду кремнію та інші.

Як армуючі елементи при створенні композитів на основі металевих матриць застосовуються тонкі дроти зі сталі, вольфраму, берилія, титану, ніобію і інших металів. На **рис. 4.16** приведені діаграми розтягу деяких типів армуючих волокон.

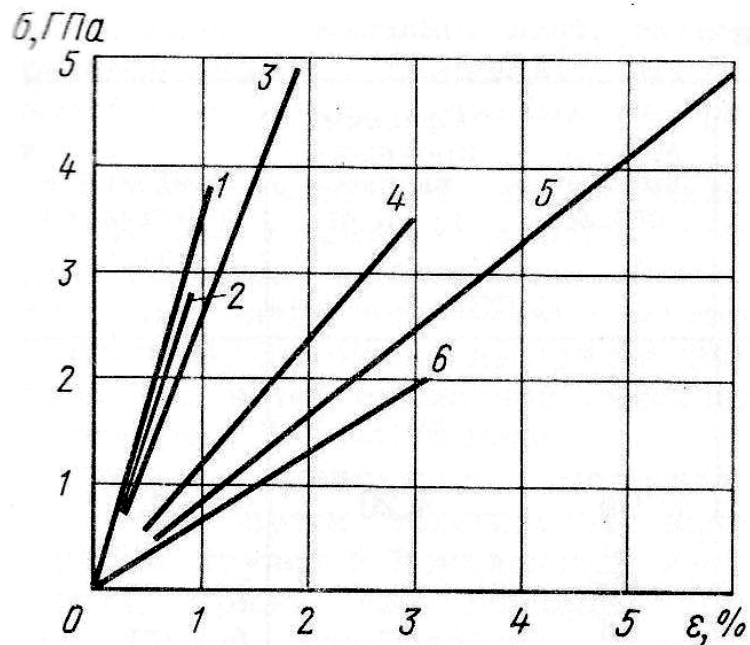


Рис. 4.16 -- Характерні діаграми розтягу високоміцних волокон, вживаних в сучасних КМ: 1 - борні; 2 - високомодульні; 3 - високоміцні вуглецеві; 4 - органічні; 5 - S-скло; 6 - E-стекло

Армуючі волокна можуть мати неоднорідну структуру і мати анізотропію механічних характеристик. До волокон з суттєвою анізотропією відносяться органічні арамідні, вуглецеві та борні волокна. Скловолокно і металеві волокна розглядаються як однорідні і ізотропні.

Анізотропія властивостей волокон може зробити істотний вплив на характеристики композитів на їх основі.

Скляні волокна

Скляні волокна широко застосовують при створенні неметалічних конструкційних композитів - склопластиків.

При порівняно малій щільності $(2,4 \dots 2,6) \cdot 10^3 \text{ кг / м}^3$ вони мають високу міцність, низьку теплопровідність, теплостійкість, стійкість до хімічної і біологічної дії.

Форма перерізу скловолокна - круг 1 (рис. 4.17). Проте виробляються і порожнисті волокна 2, і профільовані з формою перерізу у вигляді трикутника 5, квадрата 4, шестикутника 3, прямокутника 6.

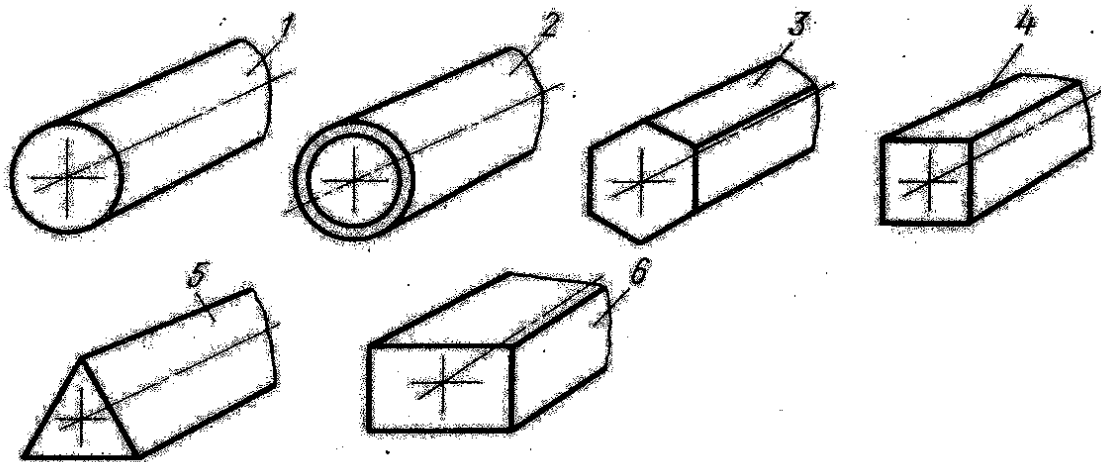


Рис. 4.17 -- Форми перерізу скляних волокон

Безперервні волокна отримують витягуванням розплавленої скломаси через філь'єри діаметром 0.8 ... 3.0 мм і подальшим швидким витягування до діаметру 3 ... 19 мкм.

Кварцеве волокно, в основному, отримують із стержнів витягуванням, оскільки кварц навіть при температурі 2400 К має дуже високу в'язкість, що утрудняє формування його з розплаву.

По міцності скловолокна значно (на один - два порядки) перевершують скло у вигляді блоків.

На міцність скловолокна визначальний вплив робить стан поверхні волокон, яке залежать від умов формування.

Високомодульне скловолокно має такі механічні характеристики:

- густина 2.40 ... 2.58 г / см³;
- модуль пружності 83 ... 95 ГПа;
- середня границя міцності на базі 10 мм 4.20 ГПа (для порівняння - міцність легованих сталей 1.6 ... 2.2 ГПа);
- гранична деформація 4.8%.

Скловолокна застосовуються як армуючі елементи композитів у вигляді джгутів і ниток з елементарних волокон, стрічок, тканин різноманітного плетіння, матів, полотен і інших нетканих матеріалів.

Органічні волокна

Для отримання високоміцних і високомодульних композитів з полімерною матрицею (органопластиків) застосовують волокна на основі ароматичних поліамідів (арамідів).

Високомодульні і високоміцні арамідні волокна мають унікальний комплекс властивостей:

- густина 1.43 ... 1.45 г / см³;
- висока середня міцність (на базі 10 мм 2.1 ... 4.2 ГПа);
- гранична деформація 2.7 ... 5.0%;
- високий модуль пружності (110 ... 160 ГПа);

- високу термостабільність, що дозволяє експлуатувати їх в широкому температурному діапазоні;
- хороші діелектричні властивості;
- незначна повзучість.

Завдяки низькій густині арамідні волокна по питомій міцності перевершують усі відомі нині армуючі волокна і металеві сплави, поступаючись за питомим модулем пружності лише вуглецевим і борним волокнам.

Арамідні волокна відрізняються хорошою здатністю до текстильної переробки. Так, збереження міцності арамідних волокон після ткацтва складає 90% початкової міцності ниток, що дає можливість застосовувати їх в якості тканих армуючих матеріалів.

Вуглецеві волокна

Вуглецеві волокна мають комплекс цінних, а, за рядом показників, унікальних механічних і фізико-хімічних властивостей.

Вуглецевим волокнам властиві висока теплостійкість, низькі коефіцієнти тертя і термічного розширення, висока стійкість до атмосферних впливів і хімічних реагентів, різні електрофізичні властивості (від напівпровідників до провідників).

Вуглецеві волокна мають високі значення питомих механічних характеристик.

Вуглецеві волокна діляться на карбонізовані (температура термообробки 1773 ... 2273 К, вміст вуглецю 80 ... 90 %) і графітізовані (температура термообробки до 3273 К, вміст вуглецю вище 99 %).

Існують два основні типи початкових матеріалів для вуглецевих волокон: хімічні волокна - віскозні або поліакрилонітрильні (ПАН) і вуглецеві пеки.

Процес отримання вуглецевих волокон з ПАН-волокон включає текстильну підготовку матеріалу, окислення, високотемпературну обробку (карбонізацію і графітизацію).

Окислення полегшує дегідрування полімеру, створює умови для створення оптимальної структури вуглецю.

З метою уникнення усадки волокон при окисненні проводять їх витяг для поліпшення якості.

В процесі високотемпературної обробки здійснюється перехід від органічного до вуглецевого волокна. При цьому відбуваються складні процеси ароматизації вуглецю і формування структури вуглецевого волокна.

Обробка проводиться у вакуумі або в інертному середовищі - азоті, гелії, аргоні. Кінцева температура термообробки істотно впливає на властивості вуглецевих волокон. Змінюючи її, можна управляти властивостями волокна.

Дешевші і доступніші початкові матеріали - нафтові і кам'яновугільні пеки, що є сумішшю олігомерних продуктів.

Волокна з них формують, пропускаючи розплав при температурі 370 ... 620 К через філь'єри діаметром 0.3 мм. Потім сформоване волокно витягується до міри витягу 100 000 ... 500 000 %. При цьому досягається висока орієнтація макромолекул волокна. Карбонізація і графітизація пекових волокон виконується аналогічно ПАН-волокнам.

Вуглецеві волокна мають фібрилярну будову. Характерний елемент структури - закриті пори, які можуть займати до 33% об'єму волокна.

Пори мають голкоподібну форму, орієнтовані вони уздовж осі волокна, їх середня довжина $(2-3) \cdot 10^{-2}$ мкм, а діаметр $(1-2) \cdot 10^{-3}$ мкм. Збільшення числа пор знижує міцність волокна при розтягуванні.

Структура вуглецевого волокна показана на **рис. 4.18**.

Вуглецеві волокна, що застосовуються для армування конструкційних матеріалів, умовно діляться на дві групи: високомодульні ($E = 300 \dots 700$ ГПа, $\sigma_p = 2 \dots 2.5$ ГПа) і високоміцні ($E = 200 \dots 250$ ГПа, $\sigma_p = 2.5 \dots 3.2$ ГПа).

Отримані також волокна, в яких поєднуються висока міцність і високий модуль пружності. Високоміцні високомодульні вуглецеві волокна мають такі механічні характеристики:

- густина $1.5 \dots 1.9$ г / см³;
- модуль пружності до 600 ГПа;
- середня міцність на базі 10 мм $1.4 \dots 3.5$ ГПа;
- гранична деформація 2,7-5,0%.

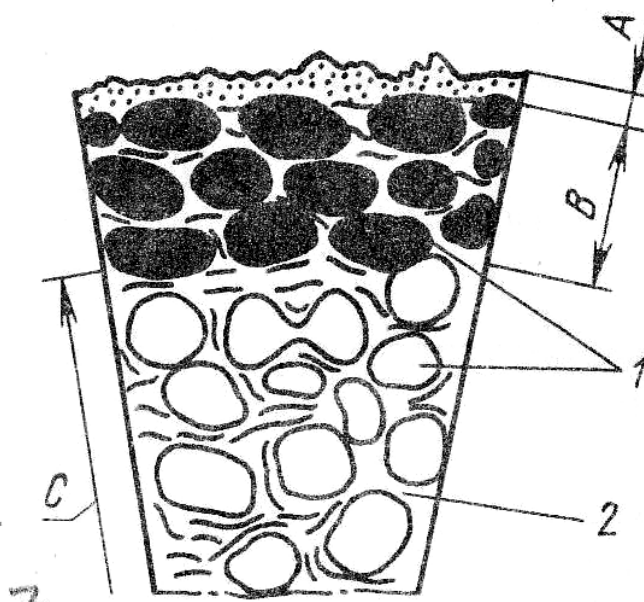


Рис. 4.18 -- Структура вуглецевого волокна: А - поверхневий шар; У - високоорієнтована зона; З - низкоорієнтована зона; 1 - мікрофібрили; 2 - аморфний вуглець.

Борні волокна

Композити на основі борних волокон мають високу міцність (при розтяганні і стисканні), високі втомні характеристики, а також високий модуль пружності.

Борні волокна є безперервними моноволокнами, неоднорідними за структурою і анізотропними. Діаметр волокон складає 5 ... 200 мкм.

Традиційним методом отримання волокон бору є його хімічне осадження при високій температурі (1400 К) з суміші газів $BCL_3 + H_2$ на вольфрамову підкладку у вигляді ниток діаметром ~12 мкм.

В результаті осадження утворюється серцевина з бориду вольфраму (W_2B_5 і WB) діаметром 15 ... 17 мкм, навколо якої розташовується шар полікристалічного бору.

Домішки в початкових продуктах впливають на фазові перетворення.

Межа міцності серцевини волокна нижча від межі міцності волокна в цілому. У серцевині волокна виникають великі стисні напруження, а бор в області, прилеглий до підкладки (вольфрамозна волосина), - напруженнями розтягу.

Це веде до виникнення радіальних тріщин у борних волокнах внаслідок великого залишкового напруження, величина якого зростає зі збільшенням діаметру волокна.

Для підвищення жаростійкості борних волокон і захисту від дії деяких металевих матриць волокна покривають карбідом кремнію шляхом осадження з парогазової фази в середовищі аргону і водню. Волокна бору, покриті тонким шаром карбіду кремнію, називаються борсиком.

Руйнування волокон бору і борсику відбувається головним чином по дефектах на поверхні волокна. Поверхнєве травлення дозволяє зменшити дефектність волокна і збільшити його міцність.

Подальшого збільшення міцності можна добитися дотриманням абсолютної чистоти камери охолодження і продуктів реакції, щоб звести до мінімуму сторонні включення у волокні. Волокна бору знаходять широке застосування у виробництві композитів на основі полімерної і алюмінієвої матриць.

Композити на основі борних волокон і алюмінієвої матриці мають ряд переваг перед аналогічними матеріалами на основі полімерної матриці.

Так, вони можуть працювати при температурах до 640 К і перероблятися на звичайному технологічному устаткуванні, що використовується в металургійному виробництві.

Борні волокна мають такі механічні характеристики:

- густина 2.5 ... 2.8 г / см³;
- модуль пружності 390 .. 420 ГПа;
- середня міцність на базі 10 мм 2.9 ... 3.8 ГПа;
- гранична деформація 0.6 ... 1.0 %.

Борні волокна мають велику, в порівнянні з іншими типами армуючих волокон, зсувну жорсткість. Модуль зсуву $G = 180$ ГПа.

4.2.2. ОСНОВНІ РІВНЯННЯ, ЩО ОПИСУЮТЬ АНІЗОТРОПІЮ

Види анізотропії композиційних матеріалів

Анізотропія є наслідком впорядкованості в розташуванні структурних елементів матеріалу і їх орієнтації.

Зміна характеристики залежно від напрямку може бути вивчена шляхом аналізу симетрії геометрії фігури, утвореної векторами, відкладеними з початку координат.

Найбільш наочний спосіб аналізу симетрії: з довільного початку координат відкладаємо вектори, що зображують величину якої-небудь механічної характеристики (модулі пружності, границі міцності та текучості і відповідні деформації, коефіцієнт лінійного теплового розширення та інші характеристики).

Симетричною називається фігура, яка може бути поєднана сама з собою поворотом навколо осі або при її відображенні в площині симетрії.

Ізотропне тіло – коли усі осі є осями пружній симетрії, (рис. 4.19а).

Трансротропне тіло (трансверсальна анізотропія) – коли будь-яка вісь в площині $y-z$ є віссю симетрії, будь-яка площина, що проходить через вісь x , є площиною симетрії, (рис. 4.19б).

Ортотропне тіло (ортогональна анізотропія) – коли осі x, y, z є осями симетрії, а площини $x-y, x-z, y-z$ є площинами симетрії, (рис. 4.19в).

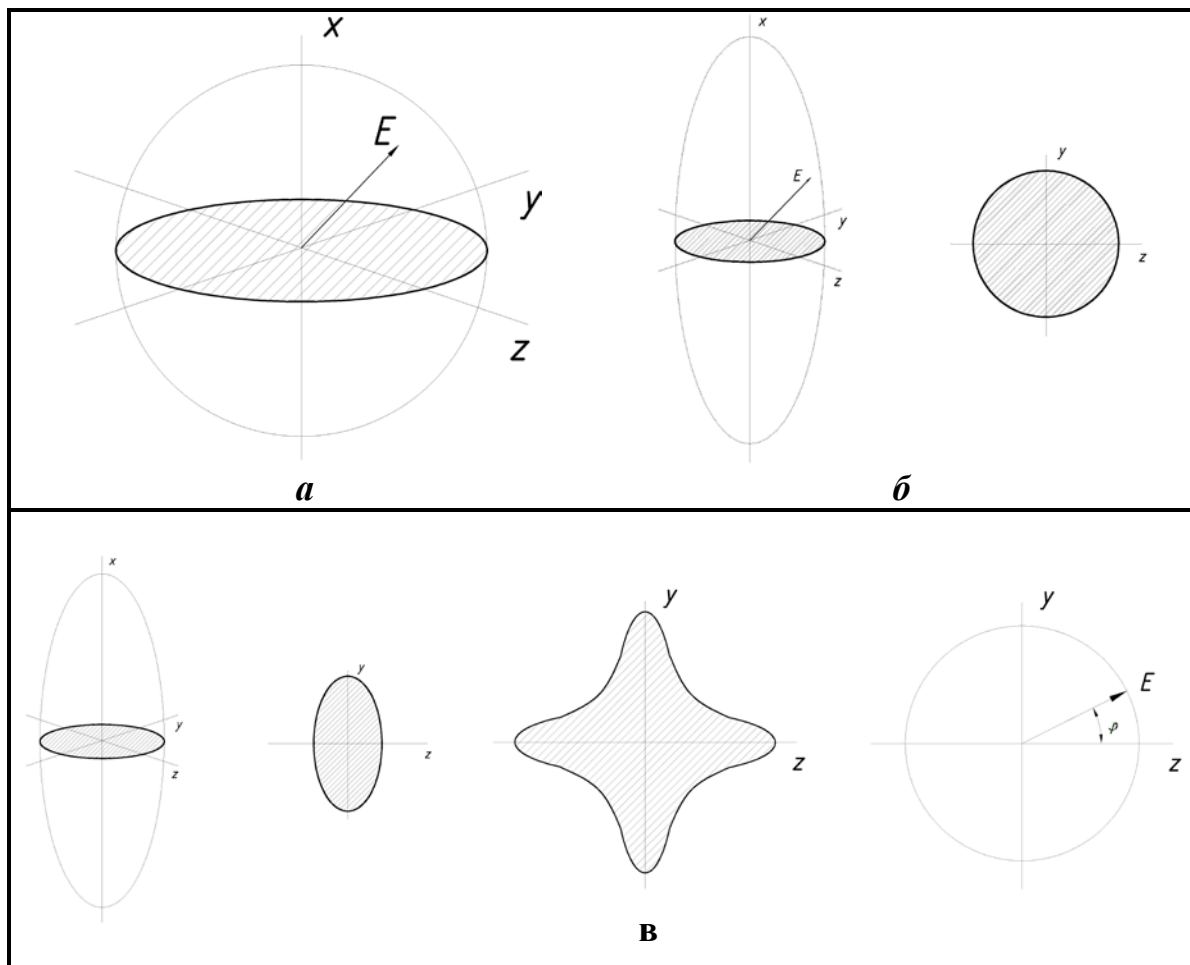


Рис. 4.19 -- Ізотропне (а), трансверсально анізотропне (б) та ортотропне (в) тіла

Основні рівняння теорії пружності анізотропних матеріалів.

Способи побудови поверхні анізотропії.

1. Фізичні рівняння в загальному вигляді.

Як показують експерименти, армовані матеріали підлягають закону Гука аж до руйнування. У тензорних позначеннях закон Гуку для анізотропних тіл з довільною формою анізотропії має вигляд:

$$\varepsilon_{ik} = \sum_{n=1}^3 \sum_{m=1}^3 A_{iknm} \sigma_{nm}; \quad i, k = 1, 2, 3 \quad (4.12)$$

$$\sigma_{ik} = \sum_{n=1}^3 \sum_{m=1}^3 B_{iknm} \varepsilon_{nm}; \quad i, k = 1, 2, 3 \quad (4.13)$$

де ε_{ik} – тензор деформацій;

σ_{ik} - тензор напружень;

A_{iknm} - тензор коефіцієнтів пружності;

B_{iknm} – тензор модулів пружності.

A и B задовольняють такі умови симетрії:

$$A_{iknm} = A_{kinm}; \quad A_{iknm} = A_{ikmn}; \quad A_{iknm} = A_{nmik}$$

$$B_{iknm} = B_{kinm}; \quad B_{iknm} = B_{ikmn}; \quad B_{iknm} = B_{nmik}$$

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_x; \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon_y; \quad \varepsilon_{33} = \varepsilon_z; \quad \varepsilon_{12} = \gamma_{xy}; \quad \varepsilon_{13} = \gamma_{xz}; \quad \varepsilon_{23} = \gamma_{yz}$$

$$\sigma_{11} = \sigma_x; \quad \sigma_{22} = \sigma_y; \quad \sigma_{33} = \sigma_z; \quad \sigma_{12} = \tau_{xy}; \quad \sigma_{13} = \tau_{xz}; \quad \sigma_{23} = \tau_{yz}$$

Закон пружності (4.12) можна представити в розгорнутому вигляді, виразивши коефіцієнти пружності через так звані «технічні сталі»:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_x} (\sigma_x - \mu_{yx}\sigma_y - \mu_{zx}\sigma_z + \eta_{yz,x}\tau_{yz} + \eta_{zx,x}\tau_{zx} + \eta_{xy,x}\tau_{xy}) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E_y} (\sigma_y - \mu_{zy}\sigma_x - \mu_{xy}\sigma_x + \eta_{yz,y}\tau_{yz} + \eta_{zx,y}\tau_{zx} + \eta_{xy,y}\tau_{xy}) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E_z} (\sigma_z - \mu_{xz}\sigma_x - \mu_{yz}\sigma_y + \eta_{yz,z}\tau_{yz} + \eta_{zx,z}\tau_{zx} + \eta_{xy,z}\tau_{xy}) \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G_{yz}} (\eta_{x,yz}\sigma_x + \eta_{y,yz}\sigma_y + \eta_{z,yz}\sigma_z + \tau_{yz} + \nu_{zx,yz}\tau_{zx} + \nu_{xy,yz}\tau_{xy}) \\ \gamma_{zx} &= \frac{1}{G_{zx}} (\eta_{x,zx}\sigma_x + \eta_{y,zx}\sigma_y + \eta_{z,zx}\sigma_z + \tau_{zx} + \nu_{xy,zx}\tau_{xy} + \nu_{yz,zx}\tau_{yz}) \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G_{xy}} (\eta_{x,xy}\sigma_x + \eta_{y,xy}\sigma_y + \eta_{z,xy}\sigma_z + \tau_{xy} + \nu_{yz,xy}\tau_{yz} + \nu_{zx,xy}\tau_{zx}) \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

Тут E_i і G_{ik} - модулі пружності першого і другого роду (рис. 4.20).

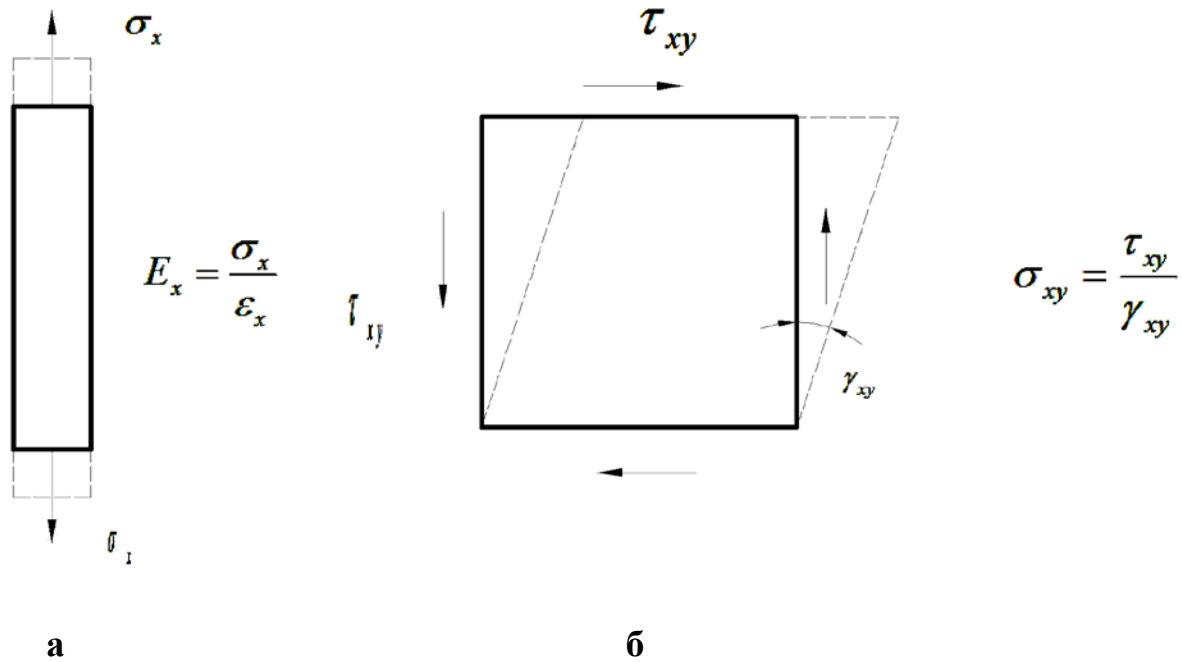


Рис. 4.20 -- Елементи, деформовані розтягом (а) та зсувом (б)

$\eta_{ik,l}$ - коефіцієнт взаємного впливу першого роду, що характеризує видовження у напрямку l , викликані дотичним напруженням τ_{ik} ;

$\eta_{i,kl}$ - коефіцієнт взаємного впливу другого роду, що характеризує зсув в площинах, паралельних осям kl , викликаний напруженням σ_i ;

$\nu_{ik,lm}$ - коефіцієнти, що характеризують зсув в площинах, паралельних осям lm , викликаний напруженнями τ_{ik} ;

Рівняння (4.14) містять 36 констант. Для них мають виконуватися ще додатково 15 співвідношень, обов'язкових для будь-якого анізотропного матеріалу, якщо для нього справедливе допущення про існування пружного потенціалу матеріалу виду :

$$U = \frac{1}{2} \sqrt{C_{iklm}} \sigma_{ik} \sigma_{lm} \sum_{l=1}^3 \sum_{m=1}^3$$

В цьому випадку справедливі такі співвідношення:

$$\frac{\mu_{ik}}{E_i} = \frac{\mu_{ki}}{E_k} \quad (3 \text{ співвідношення});$$

$$\frac{\eta_{i,kl}}{E_i} = \frac{\eta_{kl,i}}{G_{kl}} \quad (9 \text{ співвідношень});$$

$$\frac{\nu_{ik,lm}}{G_{ik}} = \frac{\nu_{lm,ik}}{G_{lm}} \quad (3 \text{ співвідношення})$$

$$(i, k = 1, 2, 3)$$

Таким чином, кількість незалежних сталих в рівнянні (4.14) дорівнює 21.

До 6 рівнянь пружності (4.14) необхідно додати 3 рівняння рівноваги:

$$\sum_{k=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} + X_i = 0; \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4.15)$$

и 6 геометричних рівнянь:

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right) \quad (i, k = 1, 2, 3) \quad (4.16)$$

Тут:

$$U_1 = u; U_2 = v; U_3 = \omega \quad - \text{переміщення};$$

$$x_1 = x; x_2 = y; x_3 = z \quad - \text{координати};$$

$$X_1 = X; X_2 = Y; X_3 = Z \quad - \text{об'ємні сили}$$

Таким чином, маємо 15 рівнянь з 15 невідомими та граничні умови

$$\sum_{i=1}^3 \sigma_{ik} \alpha_i = \widetilde{X}_k \quad (k = 1, 2, 3) \quad (4.17)$$

де

$$\alpha_1 = \cos(v, x); \alpha_2 = \cos(v, y); \alpha_3 = \cos(v, z) \quad - \text{спрямовуючі косинуси};$$

$$X_1 = X; X_2 = Y; X_3 = Z \text{ - об'ємні сили;}$$

або в переміщеннях:

$$u = u^*; v = v^*; \omega = \omega^* \text{ - проєкції переміщень на поверхні.}$$

Окремі випадки анізотронії

Ортогональна анізотронія

Найчастіше в техніці зустрічаються матеріали, яким з достатньою точністю можна приписати наявність трьох взаємно перпендикулярних осей симетрії. Ці матеріали називаються ортотропними (ортогонально анізотропними).

До цих матеріалів відносяться матеріали, армовані волокнами в 2-х взаємно перпендикулярних напрямках (у і z) (склопластики і інші).

Транстропні матеріали

У цих матеріалів усі осі, що лежать в одній з площин симетрії, еквівалентні одна одній. В цьому випадку переріз поверхні координатною площиною уз перетвориться на круг. До цих матеріалів відносяться пластики, армовані в одному напрямі (x).

Закон Гука для ортотропних матеріалів у тензорній формі:

$$\varepsilon_{ik} = \sum_{n=1}^2 \sum_{m=1}^2 A_{iknm} \sigma_{nm}; \quad i, k = 1, 2, 3 \quad (4.18)$$

$$\sigma_{ik} = \sum_{n=1}^2 \sum_{m=1}^2 B_{iknm} \varepsilon_{nm}; \quad i, k = 1, 2, 3 \quad (4.19)$$

Якщо координатні осі нормальні до площин симетрії, то (4.18) можна спростити:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z \\ \varepsilon_y &= a_{21}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{23}\sigma_z \\ \varepsilon_z &= a_{31}\sigma_x + a_{32}\sigma_y + a_{33}\sigma_z \\ \gamma_{yz} &= a_{44}\tau_{yz} \\ \gamma_{xz} &= a_{55}\tau_{xz} \\ \gamma_{xy} &= a_{66}\tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

Або в «технічних сталих»:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\mu_{yz}}{E_y}\sigma_y - \frac{\mu_{zx}}{E_z}\sigma_z \\ \varepsilon_y &= -\frac{\mu_{xy}}{E_x}\sigma_x + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\mu_{zy}}{E_z}\sigma_z \\ \varepsilon_z &= -\frac{\mu_{xz}}{E_x}\sigma_x - \frac{\mu_{yz}}{E_y}\sigma_y + \frac{\sigma_z}{E_z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{\sigma_{xy}} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{\sigma_{yz}} \\ \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{\sigma_{zx}} \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

Перший індекс при μ - напрямок напруження, другий - напрямок деформації.

Приклад визначення характеристик анізотропних матеріалів у різних напрямках відносно осей пружної симетрії

В різних галузях промисловості широке застосування набувають анізотропні матеріали типу листів, полотен або плівок. Їх анізотропія обумовлена наявністю армуючих елементів або витяжкою листових матеріалів в одному чи в двох напрямках.

Для таких матеріалів можна розглядати розв'язання задач в рівняннях плоского напруженого стану, коли $\sigma_z = 0$. Для дослідження пружного стану необхідно знати чотири характеристики, за які можна вибрати:

- модуль пружності E_0 у напрямку основи;
- модуль пружності E_{90} у перпендикулярному напрямку;
- модуль пружності E_{45} у напрямку $\pi/4$ до осі пружної симетрії;
- коефіцієнт Пуасона μ_{90} , що характеризує скорочення у поперечному напрямку при розтязі вздовж головної осі .

Розв'язок задачі теорії пружності для анізотропного матеріалу дає співвідношення між пружними характеристиками для довільного напрямку (φ) відносно осей пружності симетрії матеріалу:

$$E(\varphi) = \frac{\lambda \cdot E_0}{\lambda \cdot \cos^4 \varphi + 2B \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \varphi + \sin^4 \varphi}; \quad (4.22)$$

$$\lambda = \frac{E_{90}}{E_0}; \quad 2B = 4 \frac{E_{90}}{E_{45}} - (1 + \lambda);$$

$$G(\varphi) = \frac{G_0}{1 - (1 - C) \sin^2 2\varphi}; \quad (4.23)$$

$$C = \frac{G_0}{G_{45}} = \frac{1 + \lambda + 2\mu_{90}}{2B + 2\mu_{90}}; \quad G_0 = \frac{\lambda E_0}{2B + 2\mu_{90}};$$

$$\mu(\varphi) = \frac{\mu_{90} - \frac{1}{4}(1 + \lambda - 2B) \cdot \sin^2 2\varphi}{\lambda \cdot \cos^4 \varphi + 2B \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \varphi + \sin^4 \varphi}; \quad (4.24)$$

Зберігаючи прийняті позначення, у випадку пружного стану залежність границі міцності від напрямку по відношенню до осей пружної симетрії може бути представлена виразами:

$$\sigma_p = \frac{\lambda_\sigma \cdot \sigma_{p(0)}}{\lambda_\sigma \cdot \cos^4 \varphi + 2B_\sigma \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \varphi + \sin^4 \varphi}, \quad (4.25)$$

де

$$\lambda_\sigma = \frac{\sigma_{p(90)}}{\sigma_{p(0)}}; \quad 2B_\sigma = 4 \frac{\sigma_{p(90)}}{\sigma_{p(45)}} - (1 + \lambda_\sigma).$$

Аналогічно для ε_{\max} :

$$\varepsilon_{\max}(\varphi) = \frac{\lambda_\varepsilon \cdot \varepsilon_{\max(0)}}{\lambda_\varepsilon \cdot \cos^4 \varphi + 2B_\varepsilon \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \varphi + \sin^4 \varphi}; \quad (4.26)$$

$$\lambda_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\max(90)}}{\varepsilon_{\max(0)}}; \quad 2B_\varepsilon = 4 \frac{\varepsilon_{\max(90)}}{\varepsilon_{\max(45)}} - (1 - \lambda_\varepsilon).$$

4.2.3. ТЕОРІЇ МІЦНОСТІ АНІЗОТРОПНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вважаємо, що завдання теорії пружності анізотропного тіла вирішена і головні напруження σ_1, σ_2 та σ_3 відомі. Величини σ_1, σ_2 та σ_3 приймемо за декартові координати точки в тривимірному просторі, віднесеному до осей головних напружень. Кожна точка цього простору зображує деякий напружений стан.

Переміщаючись в просторі в деякому напрямку ОМ, визначимо точку, що відповідає початку руйнування або граничному напруженому стану. Сукупність граничних точок утворює граничну поверхню або поверхню руйнування :

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0$$

Умова міцності $F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \leq 0$

На основі цього рівняння розробляються конкретні критерії міцності.

При побудові критеріїв міцності композиційних матеріалів необхідно передусім враховувати анізотропію міцності.

Критерій Нориса для площини xu ортотропного матеріалу має вигляд:

$$\left(\frac{\sigma_x}{R_x}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_x \sigma_y}{R_x R_y}\right) + \left(\frac{\sigma_y}{R_y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{T_{xy}}\right)^2 = 1,$$

де R_x, R_y - границі міцності при розтягуванні у напрямку пружної симетрії;

T_{xy} - границі міцності при зсуві в площині пружної симетрії.

Критерій, отриманий з умови пластичності Мізеса для анізотропних матеріалів шляхом заміни границі втоми границею міцності.

Не враховує різний опір матеріалу розтягання і стисканню.

Критерій Ашкеназі у тензорному вигляді:

$$\sum_{i,k,l,m}^3 a_{iklm} \sigma_{ik} \sigma_{lm} \left[\frac{(\sigma_{ik} \delta_{ik})^2 + \sigma_{ik} \sigma_{ik}}{2} \right]^{1/2} = 0$$

У цій формулі індексам i, k, l, m необхідно послідовно надати значення 1,2,3 і підсумувати по цих індексах. Символ Кронекера

$$\delta_{ik} = 1 \quad (i = k)$$

$$\delta_{ik} = 0 \quad (i \neq k)$$

В осях симетрії для ортотропного матеріалу слід прирівняти до нуля усі індекси a_{iklm} , окрім тих, у яких індекси попарно дорівнюють один одному ($a_{1122}, a_{1133}, a_{2211}, a_{2222}, \dots$)

Для плоскої задачі цей критерій набуває вигляду:

$$\frac{\sigma_x^2}{R_x} + \frac{\sigma_y^2}{R_y} + \frac{\tau_{xy}^2}{T_{xy}} + \sigma_x \sigma_y \left(\frac{4}{R_{45}} - \frac{1}{R_x} - \frac{1}{R_y} - \frac{1}{T_{xy}} \right) = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x \sigma_y + \tau_{xy}^2}$$

Дуже добре описує результати дослідів для матеріалів з істотною анізотропією.

Критерій Гольденבלата - Кошова - це найбільш загальний критерій, що враховує різний граничний опір розтягу та стиску. Критерій записаний в тензорно-інваріантній формі:

$$\left(\sum_{i,k} \prod_{ik} \sigma_{ik}\right)^\alpha + \left(\sum_{i,k,n,m} \prod_{iknm} \sigma_{ik} \sigma_{nm}\right)^\beta + \left(\sum_{i,k,n,m,r,s} \prod_{iknmrs} \sigma_{ik} \sigma_{nm} \sigma_{rs}\right)^\gamma + \dots \leq 1$$

де \prod_{ik} , \prod_{iknm} , ... - компоненти тензорів міцності різних рангів, не залежних від поля напружень. α, β, γ - безвимірні коефіцієнти.

Для плоских задач можна обмежитися лише лінійними і квадратичними інваріантами при $\alpha = 1, \beta = 1/2$

$$\sum_{i,k} \prod_{ik} \sigma_{ik} + \sqrt{\sum_{i,k,n,m} \prod_{iknm} \sigma_{ik} \sigma_{nm}} \leq 1$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Що таке полімер ?
2. Що таке пластмаса?
3. Які сфери застосування конструкційних пластмас?
4. Назвіть переваги та недоліки полімерів порівняно з металами.
5. Що таке макромолекула?
6. Що таке ступінь полімеризації?
7. Що таке молекулярно - масовий розподіл?
8. Назвіть основні класи полімерів.
9. Яка структура аморфних та кристалічних полімерів?
10. Чим відрізняються гомополімери від співполімерів?
11. Які ознаки органічних, неорганічних та елементоорганічних полімерів?
12. Що таке конфігурація та конформація макромолекул?
13. Чим відрізняються атактичні полімери від стереорегулярних?
14. Що таке ізотактичний полімер?
15. Охарактеризуйте процеси полімеризації та поліконденсації.
16. Чим відрізняються термопластичні полімери від реактопластичних?
17. Назвіть пластмаси з підвищеними теплостійкістю та нагрівостійкістю.
18. Назвіть пластмаси з низькими температурами крихкості.
19. Назвіть основні типи композиційних матеріалів на основі полімерів.
20. Які переваги склопластиків порівняно з рештою композиційних матеріалів на основі полімерів?

ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Які відомі фізичні та фазові стани полімерів?
2. Як стан полімеру впливає на його міцність та деформаційні характеристики?
3. Який вигляд мають діаграми деформування аморфних полімерів нижче температури крихкості, в склоподібному стані, вище температури скловання?
4. У чому полягає відмінність склоподібного стану полімерів від високо-еластичного?
4. Назвати складові загальної деформації полімерів у крихкому, склоподібному та високо-еластичному станах.
5. У чому відмінність між пружною та вимушено-еластичною деформаціями?
6. Які фактори впливають на міцність та деформаційні характеристики полімерів?
7. Як впливають температура та швидкість деформування на міцність та деформаційні характеристики полімерів?
8. Які особливості деформування кристалічних полімерів?
9. Що таке тривкість полімеру та від чого вона залежить?
10. Як аналітично описуються залежності міцності полімеру від швидкості навантаження та від температури?
11. Як впливає на міцність та деформативність вимушена орієнтація макромолекул полімеру?
12. Опишіть процес деформування кристалічного полімеру.
13. Опишіть процеси, що відбуваються в кристалічних полімерах при нагріванні?

ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 3

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

ЗАПИТАННЯ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Що таке довговічність полімеру?
2. Який вид має рівняння Журкова та що воно описує?
3. Як впливає швидкість деформування на міцність полімеру?
4. Що таке критерій Бейлі та для чого він застосовується?
5. Наведіть приклад застосування критерію Бейлі.
6. Як розраховується довговічність полімеру при циклічних навантаженнях?
7. Які компоненти входять до композиційних матеріалів на основі полімерів? Опишіть їх властивості.
8. Які бувають види волокнистих полімерів? Опишіть їх властивості.
9. Основні вимоги до матриці композиційних матеріалів.
10. Основні вимоги до армуючих елементів композиційних матеріалів.
11. Класифікація композиційних матеріалів за видом матриць.
12. Класифікація композиційних матеріалів за видом армуючих елементів.
13. Класифікація волокнистих композитів за конструктивними ознаками.
14. Назвіть основні види скляних волокон для армуючих елементів.
15. Які відомі органічні волокна? У чому їх перевага?
16. Охарактеризуйте основні властивості вуглепластиків та боропластиків?
17. Які відомі види анізотропії композиційних матеріалів?
18. Запишіть фізичні рівняння анізотропного тіла у тензорному вигляді.
19. Що таке ортотропний матеріал?
20. Які відомі теорії міцності анізотропних матеріалів?

Список використаної та рекомендованої літератури

1. Ашкенази Е.К. Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. – Л.: Машиностроение, 1980.
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.
4. Джур Є.О. та ін. Полімерні матеріали в ракетно - космічній техніці: Підручник: – К.: Вища освіта, 2003.
5. Каменев В.И. и др. Применение пластических масс. – М.: Химия, 1985.
6. Калинин Э.Л., Саковцева М.Б. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий. – Л.: Химия, 1987.
7. Карпинос Д.М., Олейник В.И. Полимеры и композиционные материалы на их основе в технике. – К.: Наукова думка, 1987.
8. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация: Учебное пособие – М.: Высшая школа, 1976.
9. Колтунов М.А., Майборода В.П., Зубганинов В.Г. Прочностные расчеты изделий из полимерных материалов. – М: Машиностроение. 1983. – 239 с.
10. Композиционные материалы: Справ./ Под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнапольского.- М.: Машиностроение, 1990.- 512с.
11. Кравчук А.С., Майборода В.П, Уржумцев Ю.С. Механика полимерных и композиционных материалов. Экспериментальные и численные методы. – М.:Наука, 1985.
12. Кулезнев В.Н. Шершнева В.А. Химия и физика полимеров. – М.: Высшая школа, 2003.

13. Нарисава И. Прочность полимерных материалов. – М.: Химия, 1987.
14. Огибалов П.М., Ломакин В.А., Кишкин Б.П. Механика полимеров. – М.: Изд-во МГУ. 1975. – 528 с.
15. Павлов Н.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. – М.: Химия, 1982
16. Полімерні матеріали в ракетно - космічній техніці: Підручник / Є.О. Джур та ін. – К.: Вища освіта, 2003.
17. Рысюк Б.Д., Носов М.П. Механическая анизотропия полимеров. – К.: Наук. думка, 1978. – 232с.
18. Справочник по композиционным материалам (в 2-х томах). – М.: Машиностроение, 1988.
19. Уржумцев Ю.С., Максимов Р.Ф. Прогностика деформативности полимерных материалов. – Рига: Знание. 1975. – 416 с.