

Ефективність застосування нових композиційних матеріалів багато залежить від їх міцності та жорсткості при заданих режимах експлуатації, протягом усього терміну служби. Тому, розуміння процесу деформування та руйнування, а також прогнозування довговічності цих матеріалів є одним з найважливіших завдань матеріалознавства.

На підставі великої кількості експериментальних даних співробітники ФТІ ім. А.Ф. Іоффе на чолі з професором С.М. Журковим [2, 6] зауважили, що для найрізноманітніших матеріалів у широкому інтервалі напружень та температур справедливе рівняння довговічності (1):

$$\tau = \tau_0 \exp\left[\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right], \quad (1)$$

де  $\tau$  – час до руйнування (довговічність), с;  $\tau_0$  – період коливання атомів у твердому тілі, с;  $U_0$  – ефективна енергія активації руйнування, кДж/моль;  $\gamma$  – структурно-механічний параметр, кДж/(моль·МПа);  $R$  – універсальна газова стала, кДж/(моль·К);  $\sigma$  – напруження, МПа;  $T$  – температура, К.

Стверджувалося, що для багатьох матеріалів, незалежно від їх хімічного складу, типів сил зв'язків та структури,  $\tau_0$  – період коливання атомів у твердому тілі залишається (у межах точності його визначення) приблизно постійною, в інтервалі  $10^{-12} \div 10^{-14}$  с. Початковий енергетичний бар'єр  $U_0$  близький до енергії активації розпаду міжмолекулярних зв'язків у твердих тілах: у металах – до енергії сублімації, у полімерах – до енергії активації процесу термодеструкції.

Дослідження свідчать [6], що у навантаженому тілі розвивається деякий необоротний процес руйнування.

У кінетичній теорії міцності вважається, що фізичний механізм руйнування твердих тіл будь-якої форми та при будь-якому виді вантаження однаковий. Руйнування відбувається через розриви міжатомних, а у полімерах – хімічних зв'язків внаслідок теплового руху, енергетичних сплесків (флуктуацій), які перевищують енергію цих зв'язків.

Канонічна формула С.М. Журкова описує кінетику руйнування будь-яких тіл, у т.ч. металів, полімерів, параметри яких незмінні аж до нескінченної температури. Що, як відомо, не є реальним. Тому результати подальших досліджень такого класу матеріалів, як полімери, дали змогу узагальнити цю формулу до вигляду [5]:

$$\tau = \tau_m \exp\left[\frac{U_0 - \gamma\sigma}{R}(T^{-1} - T_m^{-1})\right], \quad (2)$$

де  $\tau_m$  – мінімальна довговічність (період коливання кінетичних одиниць – атомів, груп атомів, сегментів), с;  $T_m$  – гранична температура існування твердого тіла (температура деструкції), К.

У формулі (2) енергія активації  $U_0$ , пропорційна енергії зв'язків, які розриваються та знижуються не тільки напруженням, але й температурою. У формулу (2) було додано ще один параметр  $T_m$  – максимальна температура тіла, при заданому граничному його стані.

Мінімальна довговічність  $\tau$  не може бути меншою за період коливань атомів. Тому для металів та при крихкому руйнуванні полімерів передекспоненціальний множник традиційно приймався рівним  $10^{-13}$  с.

Дослідження авторів [5] свідчать, що для більшості полімерних матеріалів при їх в'язкопружному руйнуванні відбувається зміщення полюса (тобто точки перетину прямих тривалої міцності). При цьому значення  $\tau_m$  може досягати набагато більших значень. Процес повзучості (тривалої міцності) неможливий лише завдяки коливанням атомів. Під час деформування та руйнування відбувається переміщення достатньо великих кінетичних одиниць. Критична повзучість відбувається за рахунок розривів міжмолекулярних зв'язків.

Під час порівняння величин довговічності, які наведені у роботах [6] та [2] та обчисленні за формулами довговічності відповідно (1) та (2) можуть вирізнятися до 10 порядків.

**Мета дослідження** – визначити межі застосування величини мінімальної довговічності  $\tau_m$  залежно від виду матеріалу на основі деревини.

**Методика дослідження** – базується на єдиному кінетичному підході до процесу деформування та руйнування композиційних матеріалів на основі деревини, залежно від структури та властивостей низько та високомолекулярних твердих тіл [4].

**Результати дослідження.** Оцінити величину  $\tau_{min}$  при термомеханічному вантаженні металів та полімерів можна порівнявши частоти коливань двох атомів, а так само двох ланок макромолекул, враховуючи, що період коливань атомів  $\tau_0 = 10^{-13}$  с.

Колівання атомів біля положення рівноваги описується одновимірним гармонійним осцилятором [3]:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0 \quad (3)$$

або

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = 0, \quad (4)$$

де  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{\tau_0}$  – частота коливань атома;

$m$  – маса атома;

$k$  – позитивний коефіцієнт, рівний значенню другої похідної потенційної енергії за координатою.

У разі присутності зовнішнього силового поля  $U_e$  та у припущенні невеликих коливань, рівняння руху буде:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = \frac{1}{m} F(t), \quad (5)$$

де  $F(t) = \frac{\partial U_e}{\partial x}$  – зовнішня “сила”, що діє на систему у положенні рівноваги та є заданою функцією часу.

Як відомо дія постійної сили призводить лише до зсуву положення рівноваги, навколо якої відбуваються коливання з частотою  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{\tau}$ , та означає:

$$\tau_0 = \frac{1}{\omega_0} = \sqrt{\frac{m_0}{k}} = 10^{-13}, \quad (6)$$

де  $m_0$  – маса атома.

У тому випадку, коли розглядається в'язкопружна деформація під час руйнування полімерів, критична повзучість відбувається через розрив міжмолекулярних зв'язків макромолекули.

Хоча хімічна будова макромолекул різноманітна, можна виділити декілька типових характеристик.

По-перше це розміри полімерних молекул, що налічують сотні тисяч, а деколи мільйони атомів. Тому навіть про окремо взятую макромолекулу можна говорити як про молекулярну систему. Друга особливість – це здатність полімерів змінювати свою конформацію (тобто форму молекули) у широких межах. Ще однією особливістю, що вирізняє їх від таких же за хімічним складом низькомолекулярних сполучень, є аномально низька ентропія цих систем та як наслідок – аномально висока сприйнятливості до різного роду дій. Це обумовлено тим, що через ковалентну зв'язаність ланки макромолекули не можуть рухатися незалежно один від одного.

Тому у разі руйнування полімерів необхідно прийняти:

$$\tau_m = \frac{1}{\omega_m} = \sqrt{\frac{M}{k}}, \quad (7)$$

де  $M$  – молярна маса, яка, як відомо, дорівнює:  $M_0 = m_0 N_A$ , число Авогадро  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>.

Остаточню величину періоду коливань кінетичних одиниць

буде:  $\tau_m = \tau_0 \sqrt{\frac{M}{m}} = 10^{-13} \sqrt{6,022 \cdot 10^{23}} = 10^{-1,1}$  с.

На підставі отриманих раніше показників температурно-часових залежностей, були визначені параметри матеріалів, значення яких наведені у таблиці [1]:

**Термоактиваційні параметри личкованих СП у плоскому напруженому стані (згин)**

Матеріал	Термоактиваційні параметри матеріалу			
	$\lg(\tau_m)$	$U_0$ , кДж/моль	$\gamma$ , кДж/(МПа·моль)	$T_m$ , К
СП личкована шпоном дуба	- 0,33	257	11,4	421
СП личкована шпоном вільхи	- 1,3	231	9,6	457
СП ламінована	- 0,7	196	9,1	486
СП кашірована	- 1,4	204	8,5	455

Як впливає з результатів досліджень, для великого числа полімерів та полімерних композиційних матеріалів на основі деревини, порядок величини збігається з отриманим результатом.

### Висновки

Значення передекспоненціального множника у феноменологічній моделі руйнування, що визначається узагальненою формулою професора С.М. Журкова для різних видів матеріалів має прийматися рівним за величиною. Так, для більшості металів його значення встановлюються у межах  $10^{-12} \div 10^{-14}$  с. Для багатьох типів полімерів та композиційних матеріалів на основі деревини його значення значно більше та перебуває у межах  $10^{-2} \div 10^{-1}$  с.

### Список літератури

1. Бойко Л.М. Дослідження взаємозв'язку термоактиваційних параметрів личкованих стружкових плит при прогнозуванні довговічності / Л.М. Бойко, С.М. Кульман // Міжнародна наукова конференція «Стан та перспективи розвитку деревообробки», 17–18 травня 2011 р.: зб. тез доповідей. – Львів: НЛТУ України, 2011. – Вип. 37.1. – С. 81–83.
2. Журков С.Н. Микромеханика разрушения полимеров / С.Н. Журков, В.С. Куксенко // Механика полимеров. – 1974. – № 8. – С. 35–41.
3. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: том I. Механика: учебное пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – [5-е изд.]. – М.: Наука, 2007. – 204 с.
4. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: том VII. Теория упругости: учебное пособие / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – [5-е изд.]. – М.: Физматлит. – 2007. – 264 с.
5. Ратнер С.Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев. – М.: Химия, 1992. – 320 с.
6. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томошевский. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

*Исследованы температурно-силовые зависимости долговечности композиционных материалов на основе древесины. Найдена зависимость величины предэкспоненциального множителя в зависимости от вида материалов при их деформировании и разрушении.*

**Композиционные материалы, кинетика деформирования, долговечность.**

*Investigated the temperature and power dependence of longevity of composite materials based on wood. The dependence of the value of pre-exponential factor depending on the type of materials to deformation and fracture.*

**Composites, kinetics deformation, durability.**