

УДК 684.4.04

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ДЕРЕВИНИ ПІД ЧАС ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

DYNAMIC MODEL OF FATIGUE FRACTURE COMPOSITE WOOD BASED MATERIALS UNDER CYCLIC

Кульман С.М, к.т.н. (Науково виробнича фірма «Компанія ІНТЕРДИЗАЙН»)

Kulman S.M. (Scientific and Production Company "InterDesign Company")

Перехресний вплив ефекту термічного розширення та ефекту термопружності у полі зовнішніх силових циклічних навантажень, призводить до виникнення автоколивань динамічної системи, та переводить систему в область стійкого граничного циклу, аттрактора.

Cross-impact effect of thermal expansion and thermoelastic effects in the field of external force cyclic loading, leads to self-oscillation dynamic system, and puts the system in a stable boundary cycle attractor.

Актуальність роботи. Широке використання композиційних матеріалів у різних галузях промисловості, особливо в умовах підвищеного впливу руйнівних факторів, призводить до необхідності дослідження їх характеристик на міцність, для контролю руйнування та прогнозування ресурсу довговічності.

Аналіз останніх досліджень. У роботах [1, 2, 3] досліджена тривала міцність композиційних матеріалів на основі деревини під дією постійного термо-механічного навантаження.

Запропонована нелінійна динамічна модель поведінки цих матеріалів під час їх деформації під дією постійного навантаження, може бути покладена в основу методики прогнозування їх довговічності.

У роботах [3, 4] досліджено кінетику, а саме вплив нелінійних ефектів взаємодії внутрішніх факторів на тривалу міцність. Виявлено, що саме присутність перехресних ефектів під час деформування

ламінованої стружкової плити (ЛСП) призводить до накопичення локальних руйнувань, та у кінцевому підсумку до глобального руйнування.

Особливість динамічної системи у вигляді диференціальних рівнянь наведеної у роботі [5] полягає у тому, що вона не враховує теплообмін цієї системи з термостатом, оскільки зміна температури, навантаженого постійною зовнішньою силою тіла, згідно розрахунків за моделлю, склала малу величину, якою можна знехтувати. Температура під час деформації коливалася із амплітудою що не перевищує $\Delta T = 0,002 K$.

Для роботи більшості конструкційних матеріалів характерна періодична зміна напруження та деформації. Оцінки прогнозу їх працездатності, а інколи шляхи підвищення, відрізняються від способів та методів, застосованих для короточасних, або тривалих статичних навантажень.

Мета дослідження – розробити наукові основи методу контролю руйнування композиційних матеріалів на основі деревини під час пружно-пластичної деформації, що забезпечує прогноз довговічності та підвищення якості продукції.

Методика досліджень базувалася на обліку ролі зв'язаних явищ під час деформування неоднорідних матеріалів. Таким чином, модель реальної картини деформування структурно-неоднорідних матеріалів повинна бути зв'язаною, тобто повинна описуватися рівняннями які містять як прямі, так та зворотні ефекти.

Результати досліджень. Пружність полімерних матеріалів носить нерівноважний характер. Під час циклічного навантаження відбуваються механічні втрати, що викликають тепловиділення у всьому об'ємі зразка, тобто його саморозігрів.

Розігрівання композиту під дією циклічного навантаження можна розглядати як процес конкуренції між впливом температури на теплоприхід у процесі деформації, $Q^+(T)$ та тепловідвід у навколишнє середовище $Q^-(T)$:

$$\frac{dT}{dt} = Q^+(T) - Q^-(T) \quad (1).$$

Враховуючи перехресні впливи ефектів, що прийняті до уваги, отримаємо:

$$Q^+(T) = \alpha (T - T_0) \sigma + \beta \varepsilon \sigma / 2; \quad (2)$$

$$Q^-(T) = \gamma (T - T_0); \quad (3)$$

$$\gamma = hS/V \quad (4),$$

де γ – коефіцієнт пропорційності, що враховує особливості теплопередачі [5]; h – коефіцієнт теплопередачі; S – площа поверхні

зразка; V – об’єм зразка; T_0 – температура термостата у момент $t = 0$; $\beta = f(c_v, \rho, E_D)$ – коефіцієнт пропорційності, що залежить від питомої теплоємності матеріалу c_v , щільності ρ та динамічного модуля пружності E_D .

Динамічну модель, що описує еволюцію поведінки матеріалу під час циклічного навантаження наведено у вигляді системи диференціальних рівнянь (5).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT}{dt} = \alpha(T - T_0)\sigma + \beta \frac{1}{2} \sigma \varepsilon - \gamma(T - T_0) \\ \frac{d\sigma}{dt} = \varepsilon E + \alpha(T - T_0)E - (\sigma - Y) \\ \frac{d\varepsilon}{dt} = \alpha(T - T_0) - \frac{\sigma - Y}{E} \\ \frac{dY}{dt} = \sigma_0 \sin(\omega x) \\ \frac{dx}{dt} = \delta \end{array} \right. \quad (5)$$

Форма циклу навантаження згідно початкових умов показана на Рис. 1. Рішення системи (5) методом Рунге-Кутта четвертого порядку наведено на Рис. 2 у вигляді фазових траєкторій, у режимі безперервного часу, що дозволяє простежити еволюцію системи.

Прийmemo в якості об’єкта дослідження ЛСП, виробництва ТОВ «Кроно-Україна». Заводські характеристики матеріалу: модуль пружності $E = 2600$ МПа, межа міцності на згин $[\sigma] = 14$ МПа, щільність 700 кг/м³, $\alpha = 0,00006$ K⁻¹, $\beta = 100$, $\gamma = 0,0015$. При початкових умовах: $t = t_0$; $T_0 = 300$ K; $\sigma_0 = 5$ МПа; $\varepsilon_0 = \sigma_0/E$; $\delta = 1$; $\omega = 2$.

Аналіз результатів комп’ютерного моделювання, наведений на Рис. 1, 2, 3 дозволяє виділити ряд особливостей її поведінки. Зокрема, динамічна система (5) описує процес коливання та періодичність зміни внутрішніх напружень, деформацій та температури.

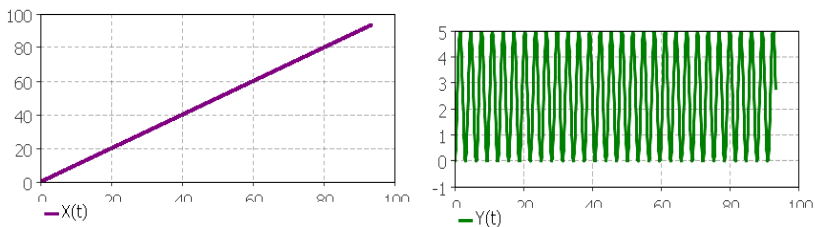


Рис. 1. Зміна параметра $X(t)$ у перших 100 умовних циклів коливань, форма циклічних коливань параметра $Y(t)$ при заданих початкових умовах

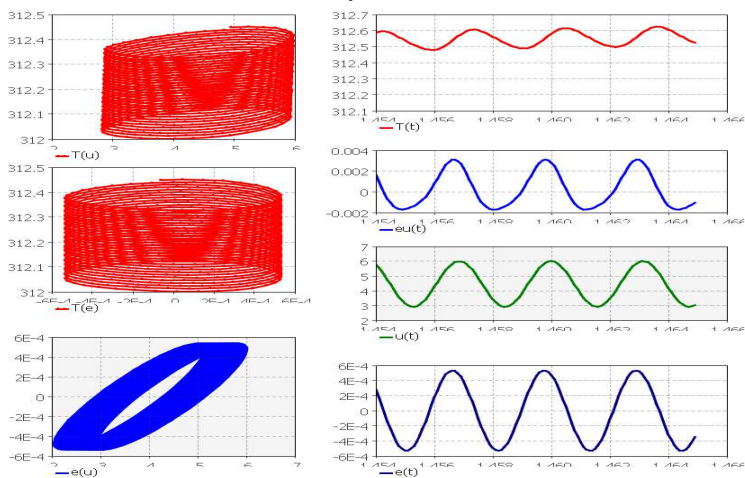


Рис. 2. Фазовий портрет динамічної системи через 1460 умовних циклів (u – напруження; e – деформація; T – температура; eu – робота деформації; фазові діаграми залежності деформації $e(u)$ та локальної температури $T(u)$ у зоні локальної деформації від напруження u)

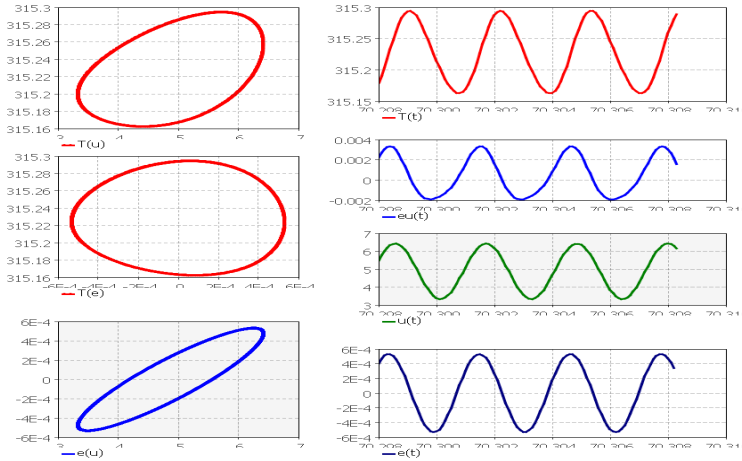


Рис. 3. Фазовий портрет динамічної системи через 10000 умовних циклів коливань, стан граничного стійкого циклу, аттрактора

У початковий момент еволюції, під дією циклічного навантаження температура починає підвищуватися. Швидкість зміни температури при цьому $dT/dt = 0,6 \text{ K/c}$, (Рис. 3). Після цього швидкість підвищення температури знижується, та у момент $t = 280$ циклів складає $dT/dt = 0,018 \text{ K/c}$, проте її зростання продовжується (Рис. 4). Температура стабілізується приблизно через 1500 циклів.

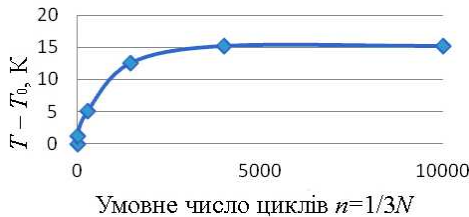


Рис. 4. Підвищення середньої температури залежно від кількості циклів навантаження (динамічна модель)

На Рис. 4 наведено еволюцію динамічної системи, що привела її в область стійкого граничного циклу, аттрактора. У якому величини всіх внутрішніх параметрів, що описують її поведінку змінюються строго циклічно, коливаючись біля своїх середніх величин.

Внаслідок зсуву фаз між напруженням та деформацією, робота пружних сил призводить до дисипації пружної енергії та виробляється

теплота. У цьому стані теплоприхід дорівнює тепловідводу, що дозволяє системі перебувати у стаціонарному стані. При цьому надходження енергії ззовні системи рівняється її витрачанням всередині системи.

Результати натурального експерименту. З метою перевірки динамічної моделі (5) були проведені дослідження на спеціальній установці, що дозволяє проводити циклічні випробування. Матеріали та умови проведення експерименту були аналогічні із комп'ютерним моделюванням. Результати вимірювання середньої температури у найбільш навантаженій зоні зразка ЛСП, що закріплений консольно січенням 50 x 18 мм, довжиною консолі 300 мм, при частоті циклічного навантаження 8,33 Гц та амплітуді коливань 18,47 мм наведено на Рис. 5.

Під час порівняння отриманих у натурному експерименті (Рис. 5) даних із результатами машинного моделювання (Рис. 4) виявлено, що динамічна модель не тільки якісно описує поведінку досліджуваного матеріалу у часі, але достатньо близька до його кількісного опису.

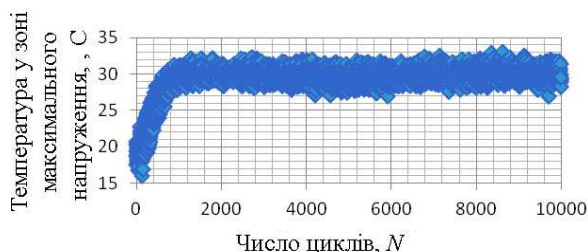


Рис. 5. Підвищення середньої температури залежно від кількості циклів навантаження (натурний експеримент)

Загальний характер поведінки середньої температури приводить до висновку, що для кожного матеріалу існує своя температура його максимального розігрівання, за даних умов навантаження. Ці умови визначаються обмеженим числом параметрів, що управляють, та переводять динамічну систему в область стійкого граничного циклу, аттрактора.

Висновки

1. Перехресний вплив ефекту термічного розширення та ефекту термопружності, у полі зовнішніх силових циклічних навантажень,

призводить до виникнення автоколивань динамічної системи, та переводить систему в область стійкого граничного циклу, аттрактора.

2. Нелінійна динамічна модель втомної деформації та руйнування композиційних матеріалів на основі деревини під час циклічному навантаження, може бути покладена в основу методу контролю руйнування під час пружно-пластичній деформації.

Список літератури

1. Кульман С.М. Нелінійні ефекти деформування і руйнування композиційних матеріалів на основі деревини / Кульман С.М. // Науковий вісник НУБіП України / Серія “Лісівництво та декоративне садівництво. – 2011. – Вип. 164, ч. 1. – С. 250 – 255.

2. Кульман С.М. Нелінійна динаміка деформування та руйнування композиційних матеріалів на основі деревини / Кульман С.М. // Науковий вісник НУБіП України / Серія “Лісівництво та декоративне садівництво. – 2012. – Вип. 171, ч. 2. – С. 200 – 207.

3. Кульман С.М. Кінетика тривалої міцності композиційних матеріалів на основі деревини / С.М. Кульман // Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Спеціальний випуск до VI науково-практичної конференції «Сучасні проблеми збалансованого природокористування». – Кам’янець–Подільський: ПДАТУ, 2011. – С. 196 – 206.

4. Кульман С.М. Нелінійна динамічна модель деформування та руйнування композиційних матеріалів на основі деревини / Кульман С.М. // Науковий вісник НУБіП України / Серія “Лісівництво та декоративне садівництво. – 2013. – Вип. 185, ч. 2. – С. 312 – 319.

5. Петров В.А. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. / В.А. Петров, А.Я. Башкарев, В.И. Веттергенъ. – СПб.: Политехника, 1993. – 475 с.