

УДК 684.4.04

**КІНЕТИЧНА МОДЕЛЬ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ
ПОРИСТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ
НА ОСНОВІ ДЕРЕВИНИ**

**KINETIC MODEL OF LONG DURABILITY OF POROUS
COMPOSITE MATERIALS BASED ON WOOD**

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

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

Бойко Л.М. к.т.н. (Національний університет біоресурсів і природокористування України)

Boiko L.M. (National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine)

Розроблено нові математичні моделі структурно-неоднорідних середовищ, процесів деформування, накопичення пошкоджень та руйнування. На основі обчислювальних експериментів встановлені закономірності еволюції дефектних структур. Виявлено залежності властивостей міцності пористих деревних композитів від структурних параметрів.

A new mathematical model of structurally heterogeneous environments, processes, deformation, accumulation of damage and destruction were developed. Based on computational experiments established patterns of evolution of defect structures.

Актуальність застосування стружкових плит (СП) дозволяє сформулювати комплекс показників якості, необхідних для використання плит у тих чи інших конструкціях.

Стружкові плити відносяться до структурно неоднорідних композиційним матеріалів, однак для аналізу їх роботи у конструкціях, як правило, застосовуються методи механіки суцільних деформованих середовищ.

Однією із головних задач механіки СП є встановлення закономірностей зміни інтегральних показників механічних властивостей, залежно від їх структури [1]. При цьому, як правило, приймаються такі характеристики які формують структуру СП: пошарова щільність, кількість в'язучого, розміри деревних частинок та їх взаємне розташування.

Облік всіх перерахованих вище характеристик у рамках стохастичної моделі деформування та руйнування структурно-неоднорідних середовищ призводить до значного ускладнення розрахункових співвідношень внаслідок наявності досить великої кількості граничних умов [2].

Мета дослідження – побудова моделі еволюції неоднорідного пористого середовища у рамках кінетичної теорії міцності.

Метод дослідження полягав в об'єднанні кінцево-елементного розгляду полів напружень та деформацій, розрахунку довговічності перенапружених елементів структури у рамках термоактиваційного аналізу та підсумовування пошкоджень за критеріями принципу Бейлі.

Результати досліджень. Альтернативний підхід до аналізу механічних властивостей СП, у тому числі довговічності, можливий під час розгляду моделі тривалої міцності композиційних матеріалів на основі деревних наповнювачах у вигляді нелінійно-пористого середовища.

Оцінку накопичення пошкоджень у композиційному матеріалі у цьому випадку можна здійснити виходячи із принципу суперпозиції на основі кінетичної термоактиваційної концепції еквівалентних пошкоджень. Руйнування у цьому випадку розглядається як незворотний кінетичний процес накопичення пошкоджень, які прискорені температурою та механічним навантаженням.

Згідно кінетичної концепції передбачається, що існує позитивна, зростаюча в часі функція пошкодження $D(t)$, приріст якої пропорційний часу перебування матеріалу під впливом термомеханічної навантаження. Руйнування композиційного матеріалу настає, коли $D(t)$, досягає характерного для матеріалу руйнуючого значення D_f .

Для процесів, що протікають у часі може бути використаний адитивний за часом критерій тривалої міцності Бейлі, згідно з яким:

$$D(t) = \int_0^{t_f} \frac{dt}{\tau[\sigma(t), T(t), \gamma(t)]} = 1, \quad (1)$$

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

де, τ – час до руйнування (довговічність), с; τ_m , U_0 , γ , T_m – фізичні параметри, які визначаються за результатами проведення випробовувань; τ_m – мінімальна довговічність (період коливання кінетичних одиниць – атомів, груп атомів, сегментів) ($T = T_m$), с; U_0 –

максимальна енергія активації руйнування, кДж/моль; γ – структурно – механічний параметр, кДж/(мольМПа); T_m – гранична температура існування твердого тіла (температура деструкції), К; R – універсальна газова стала, кДж/(мольК); σ – напруження, МПа; T – температура, К.

Термоактиваційні параметри (ТАП), τ_m , U_0 , γ , T_m визначаються для кожного матеріалу експериментально за стандартною або прискореною методикою [3]. Для СП із захисно-декоративним покриттям та щільністю $\rho = 800 \text{ кг / м}^3$ ці значення [3]: $\tau_m = 10^{-0,33} \sim 10^{1,4} \text{ с}$, $U_0 = 193 \sim 257 \text{ кДж/моль}$, $\gamma = 8,5 \sim 11,4 \text{ кДж/(мольМПа)}$, $T_m = 421 \sim 486 \text{ К}$.

Модель локально однорідного нелінійного пористого середовища створена у програмі твердотільного параметризованого моделювання *SolidWorks* наведено на рис.1.

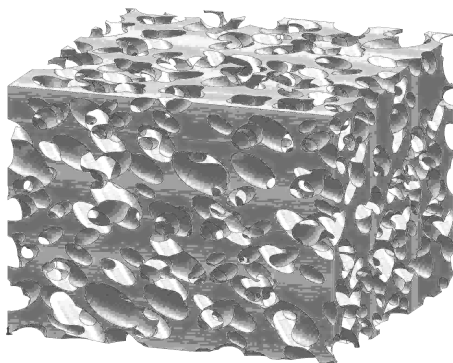


Рис. 1. Фрагмент твердотільної моделі однорідного нелінійного пористого середовища.

Пористість $P = 40 \%$, щільність $\rho = 700 \text{ кг/м}^3$.

Особливість створення моделі полягає у тому, що вона може бути створена з необхідною пористістю за даною середньою щільністю.

У даний час міцність та довговічність СП, як правило, пов'язують безпосередньо з її щільністю спираючись на парадигму механіки деформування суцільних середовища.

Однак пористість можна розглядати як елемент структури. Саме пористість, як і щільність визначається кількістю в'язучого, розмірами деревних частинок та їх взаємним розташуванням.

Пористість може бути прийнята об'єднуючим показником середовища неоднорідної структури, яка володіє локальною однорідністю із постійною щільністю, рівної середньої щільності середовища. Це дозволяє знизити розмірність фазового простору, тобто кількість змінних факторів під час побудови моделі середовища.

Моделювання тривалої міцності середовища виконуємо шляхом її опису поведінки у часі під час додавання вертикального рівномірно розподіленого навантаження $q = 10$ МПа, навколишній температурі $T = 293$ К°. Характеристики середовища прийемо для кашированого СП щільністю $\rho = 700$ кг/м³, модуль пружності $E = 2200$ МПа, межа міцності $[\sigma] = 18$ МПа, $\tau_m = 10^{-1,4}$ с, $U_0 = 204$ кДж/моль, $\gamma = 8,5$ кДж/(молМПа), $T_m = 455$ К [3].

Дослідження проведемо із використанням методу кінцевих елементів (МКЕ) у програмі SolidWorks Simulation. На Рис. 2 наведено розрахункова сітка кінцевих елементів. На Рис. 3 епюра еквівалентних внутрішніх напружень за Мизесом у момент часу t_i .

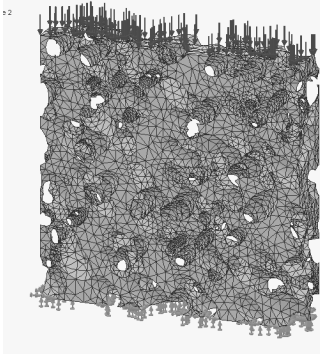


Рис. 2. Розрахункова сітка кінцевих елементів

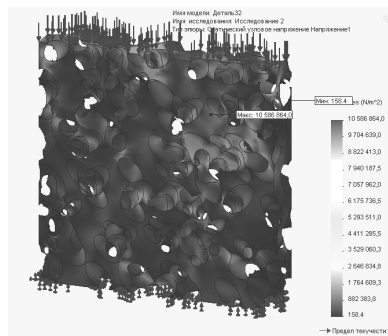


Рис. 3. Епюра внутрішніх напружень у момент t_i

Дослідження №1 проводили на моделі з пористістю $\Pi = 40$ %. Під час першого випробування № 1 максимальне напруження в окремій локальній області виявилося рівним $\sigma_{1 \max} = 229$ МПа. Що набагато більша ніж $[\sigma] = 18$ МПа. Тому цілком логічно припустити, що ця локальна область повинна вважатися зруйнованою. Програма твердотілого моделювання дозволяє, не змінюючи структури всього тіла, вилучити з нього цю локальну область. Після чого можна провести нове випробування № 2 із тими ж граничними умовами.

На рис 4 наведена епюра внутрішніх напружень після чергового випробування. На рис. 5 наведена локальна область максимального напруження після випробування.

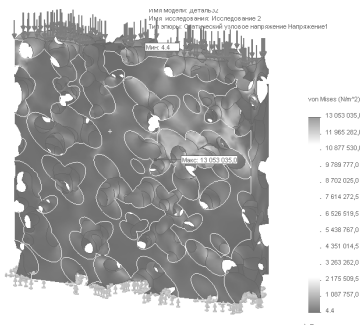


Рис. 4. епюра випробування №11

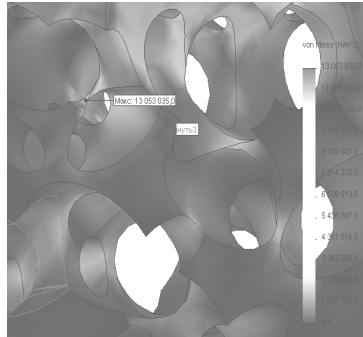


Рис. 5. Розташування області σ_{11max}

Епюра випробування № 2 показала перерозподіл напружень всередині тіла між рештою локальними областями та нову локальну область із максимальним напруженням, рівним $\sigma_{2max} = 71$ МПа.

Поступаючи аналогічно випробуванню № 1, ця область була вилучена, тобто вона не несе навантаження.

Після восьмого випробування $\sigma_{8max} = 17,6$ МПа, що менше $[\sigma] = 18$ МПа. У такому стані дана локальна область перебуватиме до руйнування певний час, величина якого може бути оцінена згідно формули (2).

Таким чином, тіло поступово втрачає несучу здатність аж до моменту глобального руйнування, тобто до об'єднання локально зруйнованих областей у безперервний перколяційний кластер. При цьому поверхня руйнування може бути або планарно, або фрактально об'ємною.

Дослідження № 2 вели на моделі із пористістю $\Pi = 20$ % аналогічно дослідженню № 1.

На рис. 6 наведена величини максимальних внутрішніх напружень у локальних областях залежно від пористості для кожного випробування.

На рис. 7 наведено криві пошкодження в одиницях нормованого часу.

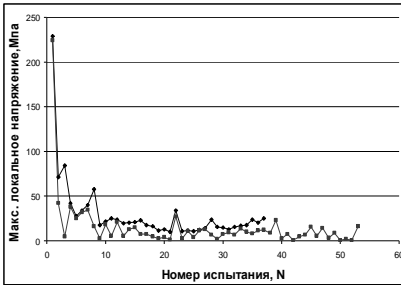


Рис. 2. Зміна локальних максимальних напружень під час випробування. $\Pi = 40\%$, $\Pi = 20\%$

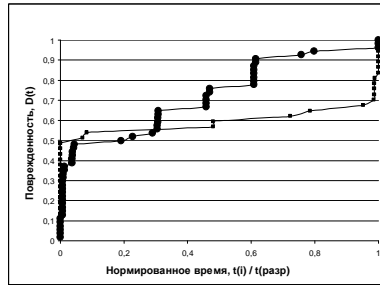


Рис. 3. Інтегральні криві пошкодження залежно від величини нормованого часу

Як впливає із результатів експериментів, під час зміни пористості змінюється характер руйнування. Це проявляється у зміні форми інтегральної кривої пошкодження. Криві пошкодження у часі якісно нагадують криві тривалої міцності СП при постійному навантаженні [3, 4, 5, 6]. При пористості $\Pi = 20\%$ час до руйнування збільшується приблизно у три рази. При цьому знижується розмах коливальних величин локальних максимальних еквівалентних напружень.

Інтегральні криві пошкодженості залежно від величини нормованого часу значно відрізняються за динамікою процесу руйнування залежно від пористості.

Так при пористості $\Pi = 40\%$ інтегральна крива пошкодженості за формою якісно порівнянна з формою кривої тривалої міцності кашированого СП [3]. Вона має швидкий початковий період пружних деформацій, квазістатичний основний період перебування тіла під час навантаження, який у момент перед руйнування переходить у режим із загостренням.

При пористості $\Pi = 20\%$ інтегральна крива пошкодження за формою порівнянна із кривою тривалої міцності, але вже менш пористого матеріалу, – МДФ. При цьому в плинні її квазістатичного режиму відбувається кілька періодичних каскадів послідовних руйнувань.

Аналіз епюр внутрішніх напружень пористого тіла, та результатів послідовного поведінки величини $\sigma_{i \max}$ показує, що при значному, стрибкоподібному зміні цієї величини, значення величини середнього напруження змінюється незначно тільки до певного

моменту, під час якого процес руйнування з квазістатичного переходить у режим із загостренням.

Висновки

Запропоновано метод твердотілого моделювання локально однорідних пористих матеріалів фрактальної структури.

Запропоновано спосіб кінетичного моделювання тривалої міцності локально однорідних пористих матеріалів. Спосіб полягає у використанні кінцево-елементних моделей для випадків довільного розташування дефектів, кінетики їх накопичення із урахуванням термоактиваційного характеру руйнування матеріалів.

Список літератури

1. Лапшин Ю.Г. Механика древесных плит/ Ю.Г. Лапшин, О.Е. Поташев.– М.: Лесная пром-сть, 1982.– 203 с.

2. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел / Ю.В. Соколкин, А.А. Ташкинов. - М.: Наука, 1984. – 115 с.

3. Бойко Л.М. Довговічність личкованих стружкових плит у конструкціях меблів [Монографія]/ Л.М. Бойко, І.Г. Грабар, С.М. Кульман. – К.: Освіта України, 2013.– 210 с.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

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