

стирання компенсується покриттям її спеціальними лаками. Зменшення межі міцності компенсується підвищеною еластичністю молекул деревини.

Застосування термодеревини у виготовленні терасної дошки дозволить підприємству вийти на новий конкурентоспроможний рівень.

Список літератури

1. <http://www.termo-drevesina.ru>
2. <http://www.tmd-drevesina.ru>
3. <http://www.drevmarket.ru/tehnologia>
4. <http://www.termo-wood.ru/production/unique/detail.php?ID=62>

Описана технология изготовления термодеревесины, представлены результаты исследований ее свойств и преимущества перед обычной древесиной для изготовления террасной доски.

Термодеревесина, исследование, зависимость, доска, свойство, изгиб, водопоглощение, стирание, среда, влага, температура, ультрафиолет.

The description of technology of thermowood, results of studies of its properties and its advantages over conventional wood for the manufacture of decking boards.

Thermowood, research, dependency, the board, property, flexural strength, water absorption, abrasion, environment, moisture, temperature, ultraviolet light.

УДК 684.4.04

НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА ДЕФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ДЕРЕВИНИ

***С.М. Кульман, кандидат технічних наук
ПП «Компанія ІНТЕРДИЗАЙН»***

Досліджено механізм нелінійної динаміки деформування та руйнування композиційних матеріалів на основі деревини. Знайдено нелінійні кінетичні залежності локальних внутрішніх напружень від температури під час деформування та руйнування. Описано характер ентропійного процесу під час деформування та руйнування.

Композиційні матеріали, нелінійна динаміка, кінетика деформування та руйнування, довговічність.

Ефективність застосування нових композиційних матеріалів набагато залежить від їх міцності та жорсткості при заданих режимах експлуатації, протягом усього терміну служби. Тому, розуміння процесу деформу-

вання та руйнування, а також прогнозування довговічності цих матеріалів, є одним з найважливіших завдань матеріалознавства.

Як відомо, оцінити довговічність композиційних матеріалів на основі деревини можна, застосовуючі кінетичне рівняння міцності Журкова-Ратнера [4]. Проте кінетична теорія міцності встановлює лише найзагальніші співвідношення між часом (довговічністю), температурою та внутрішнім напруженням.

Мета дослідження – побудувати динамічні рівняння взаємодії зовнішніх факторів (напруги та температури) та реакції на них навантаженого тіла, та на їх підставі описати кінетику процесу деформування та руйнування.

Методика дослідження базується на єдиному термодинамічному підході під час опису процесу пружного та пластичного деформування [2] із урахуванням кінетики тривалої міцності композиційних матеріалів на основі деревини [3].

Результати дослідження. При додатку постійного навантаження протягом тривалого часу, що не перевершує критичного, у тілі будуть відбуватися зміни, що пов'язані з дією зовнішніх теплових та механічних впливів. Глобально система буде перебувати у рівновазі аж до моменту її руйнування. Однак локально у навантаженому тілі будуть відбуватися процеси, які у кінцевому підсумку призведуть до глобального руйнування.

Розглянемо кінетику механізму деформування та руйнування під дією постійного навантаження і температури.

Відомо [3], що для рівноважної системи стан її динамічної рівноваги описується нерівностями Клаузіуса:

$$dS > \frac{dQ}{T}; \quad dS \geq 0, \quad (1)$$

де S – функція макростану системи, ентропія ;

dQ – кількість теплоти, що передана системі довкіллям з температурою T .

Проте оскільки ми розглядаємо нерівноважну систему, то наслідуючи ідеї І. Пригожина, для нашого нерівноважного стану, ми повинні трансформувати нерівності Клаузіуса в динамічні рівняння. З цією метою в прирості ентропії dS виділимо два доданки:

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (2)$$

де $d_e S$ – визначає кількість тепла, що поглинає система і характеризує ентропію, що отримує система ззовні;

$d_i S$ – це надлишок ентропії, що виробляє система за рахунок необоротних у ній процесів.

Згідно з формулою (1): $d_i S \geq 0$, або розглядаючи формулу (2) у

вигляді $\frac{d_i S}{dt} = \left(\frac{d_i S}{dt} \right)$, отримуємо: $\frac{d_i S}{dt} \geq 0$.

Величину $\frac{d_i S}{dt}$ називають виробництвом ентропії, і вона визначається таким співвідношенням [3]:

$$\frac{d_t S}{dt} = \sum_j F_j J_j, \quad (3)$$

де J_j – швидкості або за іншим визначенням потоки, різних необоротних процесів, що перебігають у системі, таких, наприклад, як хімічні реакції, дифузія, теплові потоки або потоки деформації;

F_j – відповідні потокам сили, наприклад градієнт температури, хімічні потенціали, градієнт дифузії тощо;

Сили викликають потоки. Наприклад, сила F_1 у вигляді незникаючого градієнта температури ($gradT$) викликає потік теплоти J_{1T} . Ця ж сила F_1 у вигляді градієнта ($gradT$) призводить до температурного розширення, що викликає градієнт напруження ($grad\sigma$), який призводить до потоку деформації $J_{1\epsilon}$.

Якщо при цьому тіло знаходиться під дією постійного зовнішнього навантаження, то сила F_2 у вигляді градієнта напруження ($grad\sigma$), від цього навантаження викликає потік деформації $J_{2\epsilon}$ і потік теплоти J_{2T} через термо-пружний ефект.

За умов близьких до термодинамічної рівноваги всі сили і відповідні їм потоки прагнуть до нуля. Тобто потоки J_j є функціями сил F_j , та перетворюються на нуль при $F_j = 0$. Для малого відхилення сил від їх нульового рівноважного положення можна передбачити, що потоки є лінійними функціями сил. Це цілком можливо припустити на підставі, наприклад, емпіричного закону Фур'є, згідно з яким потік теплоти пропорційний градієнту температури, або закону Фіка, для дифузії, під час якого потік дифузії пропорційний градієнту концентрації.

Отже, потоки J_j описуються аналітичними функціями сил F_j , як для більшості фізичних змінних. Співвідношення між потоками та силами характеризується таким феноменологічним співвідношенням:

$$J_j = \sum_k L_{jk} F_k,$$

де L_{jk} – є константами та називаються кінетичними коефіцієнтами або коефіцієнтами Онзагера, або узагальненою провідністю, оскільки вони дорівнюють потоку при одиничній силі.

В умовах лінійної нерівноважної термодинаміки, що розглядається нами, діють співвідношення взаємності Онзагера: $L_{jk} = L_{kj}$.

Тобто, якщо на потік J_j , відповідний необоротному процесу j , діє сила F_k необоротного процесу k , то сила F_j діє на потік J_k з тим же коефіцієнтом L_{jk} .

Нелінійний режим нерівноважної термодинамічної системи який розглядається нами, заснований так само, на принципі мінімуму виробництва ентропії. Він стверджує, що за заданих граничних умов, тобто при силах, що існують у системі та потоках, система переходить у стан, під час якого виробництво ентропії мінімальне:

$$\left(\frac{d}{dt}\right)\left(\frac{d_t S}{dt}\right) = 0. \quad (4)$$

Отже, якщо граничні умови ($F_{1,2}$), не дозволяють системі досягти стану термодинамічної рівноваги (тобто нульового виробництва ентропії), то вона переходить у стан з найменшою дисипацією.

Отже, на систему, що розглядається нами, – композиційний матеріал на основі деревини, який знаходиться під дією постійного зовнішнього навантаження в умовах постійної зовнішньої температури, діє дві сили: F_1 і F_2 (відповідно температура та внутрішня напруга), і два потоки: тепла J_1 і пружна енергія J_2 .

Зміна внутрішньої енергії системи під час цього становить [2]:

$$dU = TdS - \sigma d\varepsilon .$$

Оцінимо кінетику процесу зміни приросту внутрішньої енергії. Для зміни внутрішньої енергії у процесі тривалого навантаження, отримуємо:

$$\frac{dU}{dt} = T \frac{dS}{dt} - \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} .$$

Проведені раніше дослідження свідчать [4] що, зміна деформації у часі відбувається з різною швидкістю на ділянках пружної та пластичної деформації.

У цьому разі локальна внутрішня енергія в області руйнування досягає максимуму, і отже, в цій області: $\frac{dU}{dt} = 0$. Отже, в цьому випадку:

$$T \frac{dS}{dt} - \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} = 0 , \text{ і це означає:}$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{T}{\sigma} \frac{dS}{dt} . \quad (5)$$

Враховуючи, (2) перепишемо (5) у вигляді:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{T_s}{\sigma_s} \frac{d_s S}{dt} + \frac{T_l}{\sigma_l} \frac{d_l S}{dt} . \quad (6)$$

Врахуємо при цьому, що у нашому випадку зовнішні сили у вигляді температури T_s , та навантаження, у вигляді створюваної нею еквівалентної напруги σ_s , зберігають своє постійне значення. Все це означає що ентропія, що отримана системою від дій зовнішнього середовища є величиною постійною, тому перший член правої частини рівняння (6) дорівнює нулю.

Отже, у момент локального руйнування $\sigma_l \frac{d\varepsilon}{dt} = T_l \frac{d_l S}{dt}$, тобто виробництво ентропії становить: $\frac{d_l S}{dt} = \frac{\sigma_l}{T_l} \frac{d\varepsilon}{dt}$.

Користуючись принципом мінімального виробництва ентропії під час прагнення системи до стаціонарного стану (умова (4), отримаємо:

$$\frac{d}{d\sigma_l} \left(\frac{d_l S}{dt} \right) = \frac{1}{T_l} \frac{d_\sigma \varepsilon}{dt} , \quad \frac{d}{dT_l} \left(\frac{d_l S}{dt} \right) = - \frac{\sigma}{T_l^2} \frac{d_\sigma \varepsilon}{dt} .$$

Або остаточно:

$$T_l \frac{d_\sigma \varepsilon}{dt} = - \sigma_l \frac{d_{T_l} \varepsilon}{dt} , \quad (7)$$

де T_l, σ_l – відповідно, локальна температура і напруження у зоні руйнування;

$d_\sigma \varepsilon$ – деформація у зоні руйнування під час дії σ_l ;

$d_T \varepsilon$ – деформація у зоні руйнування під час дії теплового розширення (стискування) при підвищенні (зниженні) температури.

Температура та напруження у локальній зоні руйнування поведуться у повній відповідності до принципу Ле-Шательє, коли зовнішня дія, що виводить тіло з рівноваги, стимулює в ньому процеси, що прагнуть послабити дію цих сил.

Тобто внутрішнє нагрівання (охолодження) тіла у зоні локального руйнування стимулює в ньому процеси, що прагнуть знизити (підвищити) його температуру. Аналогічно збільшення (зменшення) деформації у локальній зоні стимулює процеси, що прагнуть зменшити (збільшити) в ній локальні напруження.

З формули (7) випливає, що у момент локального руйнування матеріалу, що знаходиться під дією тривалого навантаження та температури, напруження у зоні руйнування σ_i , має змінюватися у протифазі із зміною температури T_i .

Найпростіше це можна змоделювати прийнявши кінетику зміни напруження та температури у такому вигляді:

$$\frac{dT}{dt} = \sin \sigma, \quad \frac{d\sigma}{dt} = \cos T \quad (8)$$

Загальна система нелінійних динамічних рівнянь, що описують кінетику деформування та руйнування буде:

$$\frac{dI_1}{dt} = \sigma I_1 + T I_2, \quad (9)$$

$$I_1 = L_{11} \sigma + L_{12} T, \quad (10)$$

$$I_2 = L_{21} \sigma + L_{22} T, \quad (11)$$

$$\frac{dT}{dt} = \sin \sigma, \quad \frac{d\sigma}{dt} = \cos T. \quad (12)$$

Для опису загального характеру перебігу процесу приймаємо:

$$L_{12} = L_{21} = 1, \quad L_{11} = 2, \quad L_{22} = 1.$$

Результати моделювання наведено у вигляді графіків. Фазова діаграма взаємозалежності $\sigma(T)$ наведена на рис. 1, де σ позначено Y, а температуру T як X.

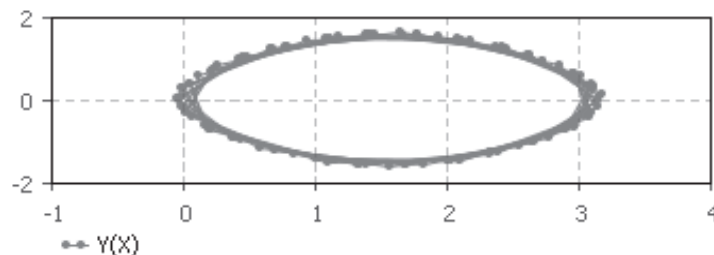


Рис. 1. Фазова діаграма взаємозалежності напруження від температури у зоні локальної деформації

На рис. 2 наведено залежності зміни (коливання) ентропії S залежно від зміни напруження та температури.

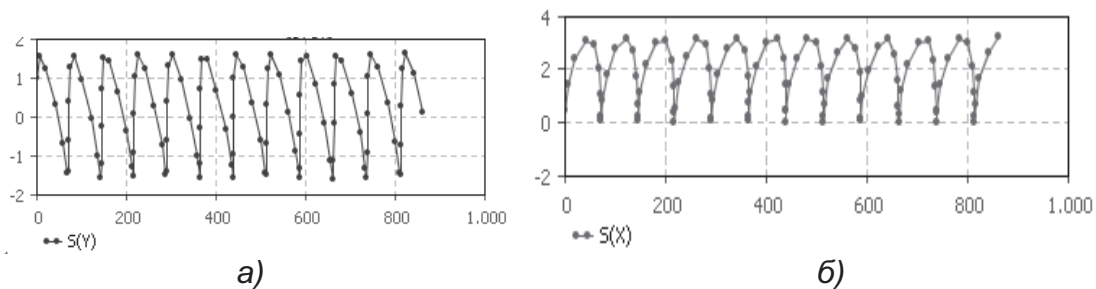


Рис. 2. Зміна ентропії в зоні локального руйнування залежно від зміни а) локальної внутрішнього напруження, ($\sigma \equiv Y$); б) локальної внутрішньої температури, ($T \equiv X$)

На рис. 3 наведено розв'язання рівняння (10) у вигляді зростаючої функції.

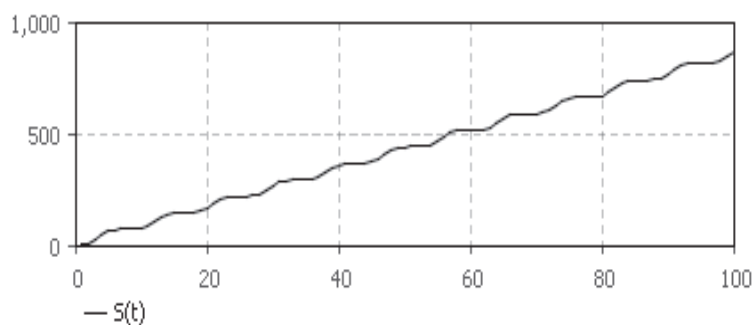


Рис. 3. Зміна ентропії S у зоні локального руйнування у часі

З рис. 3 випливає, що виробництво ентропії періодично змінюється. Ця зміна багато в чому збігається з кривою деформації, отриманою в результаті проведення натурних експериментів [1]. Причому зростання виробництва ентропії відповідає ділянці пластичної деформації та релаксації, тоді як уповільнення зростання відповідає ділянці пружної деформації. Отже, деформація – це процес періодичного виробництва ентропії.

У першому наближенні, виробництво ентропії під час тривалого вантаження тіла, відбувається внаслідок зміни T і σ у протифазі, згідно з динамічними рівняннями (12).

У реальності важко передбачити, що можна створити умови саме такого динамічно жорсткого режиму взаємодії цих чинників. Тому змінимо характер взаємодії T і σ на м'якший. Припустимо, що взаємний вплив напруження та температури відбуватиметься з незначним зміщенням фаз, що дорівнює φ :

$$\frac{dT}{dt} = \sin \sigma, \quad \frac{d\sigma}{dt} = \sin(T + \varphi). \quad (13)$$

Очевидно, що в цьому випадку, при $\varphi = \pi/2$, ми матимемо описаний вище випадок (див. рівняння (12)). При $\varphi = 0$, тобто при збігу фаз, жодної зміни внутрішнього стану тіла, і отже його руйнування відбуватися не буде, оскільки в цьому випадку виробництво ентропії $S=0$.

Виконаємо збудження динамічної системи, що описується рівняннями (9–11) незначним зрушенням фаз, наприклад, $\varphi = 0,1$, та змодельуємо її у разі виконання умов (13).

Результати такого моделювання наведено на рис. 4–7.

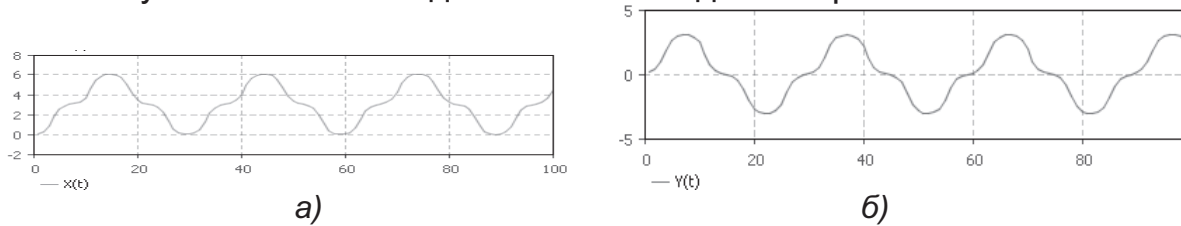


Рис. 4. Характер зміни внутрішньої температури у часі під час деформування: а) зміна внутрішньої температури ($T \equiv X$) в часі під дією внутрішнього напруження; б) зміна внутрішнього напруження ($\sigma \equiv Y$), у зоні локального руйнування в часі під дією внутрішньої температури

На рис. 4 наведено характер зміни внутрішньої температури у часі під час деформування.

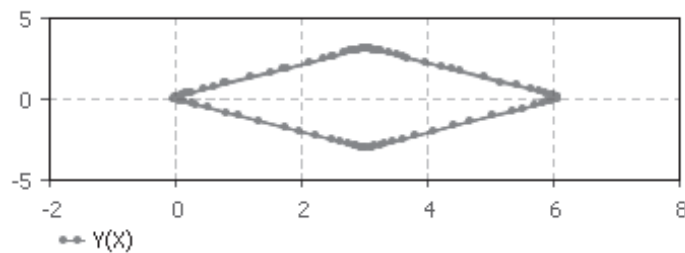


Рис. 5. Фазовий портрет системи при зміні деформації ($\sigma \equiv Y$), і температури ($T \equiv X$), згідно з рис. 4

Характер зміни ентропії (тобто характер її «виробництва») у процесі деформування та руйнування наведено на рис. 6.

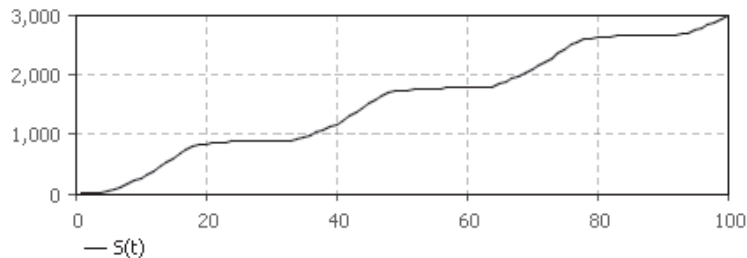


Рис. 6. Зміна ентропії в часі під час деформування та руйнування з урахуванням локальної деформації і руйнування

Характер залежності зміни виробництва ентропії від зміни T і σ наведено на рис. 7.

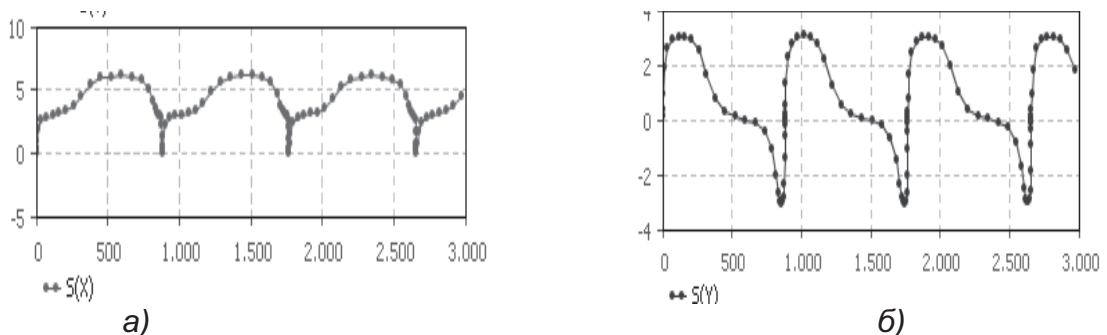


Рис. 7. Зміна ентропії у зоні локального руйнування залежно від зміни а) локального внутрішнього напруження, ($\sigma \equiv Y$); б) локальної внутрішньої температури, ($T \equiv X$)

На підставі одержаних результатів моделювання можна зауважити, що величина зсуву фаз між σ і T не впливає на характер зміни виробництва ентропії у часі. Важливо, що саме наявність цього зсуву фаз призводить до періодичного виробництва ентропії і у кінцевому підсумку до руйнування тіла.

Висновки

1. Відставання зміни локальної температури у зоні руйнування від зміни локального внутрішнього напруження у цій зоні, призводить до періодичного виробництва ентропії і в кінцевому підсумку до руйнування.

Список літератури

1. 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». –2011. – С. 196–206.

2. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Т. VII. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц: учеб. пособ. – [5-е изд.] – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 264 с.

3. Пригожин И.Р. От существующего к возникающему / Пригожин И.Р. – М.: Мир, 1985. – 327 с.

4. Ратнер С.Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев. – М. : Химия, 1992. – 320 с.

Исследован механизм нелинейной динамики деформирования и разрушения композиционных материалов на основе древесины. Найден нелинейные кинетические зависимости локальных внутренних напряжений от температуры при деформировании и разрушении. Описан характер энтропийного процесса при деформации.

Композиционные материалы, нелинейная динамика, кинетика деформирования и разрушения, долговечность.

The mechanism of the nonlinear dynamics of deformation and fracture of composite materials based on wood. Found non-linear kinetic dependence of local internal stresses on the temperature during the deformation and fracture. We describe the nature of the entropy of the process during deformation.

Composite materials, nonlinear dynamics, kinetics of deformation and fracture, longevity.