

6. Уйгелій Г.Ю. Вивчення кінетики термоокисної деструкції складників мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ методом термогравіметрії і диференційно-термічного аналізу / Г.Ю. Уйгелій // Вісник Львівського державного аграрного університету. – Сер.: Агроінженерні дослідження. – Львів : Вид-во Львівського ДАУ. – 2006. – № 10. – 311 с.

7. Уйгелій Г.Ю. Вивчення кінетичних характеристик термоокисної деструкції полімервмісних мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ / Г.Ю. Уйгелій, О. Сташок // Вісник Львівського державного аграрного університету. – Сер.: Агроінженерні дослідження. – Львів : Вид-во Львівського НАУ. – 2008. – № 12, т. 1. – 304 с.

**Уйгелій Г.Ю. Термоокислительная деструкция полимеров в присутствии низкомолекулярных компонентов смазочно-охлаждающих технологических средств**

Приведены результаты исследования процессов термоокислительной деструкции полимеров в присутствии компонентов смазочно-охлаждающих технологических средств и изучены кинетические закономерности их разложения. Методом ТГА и ДТА исследована термоокислительная деструкция полиамида эпихлорированного (ПАЭХ), полиакриламида (ПАА) в присутствии оксигетилированного спирта (ОС-20) и воды. Установлены некоторые температурно-кинетические закономерности процессов термического разложения композиций СОЖ, которые могут успешно использоваться в научном прогнозировании создания высокоэффективных технологических средств.

**Ключевые слова:** полимер, термоокислительная деструкция, низкомолекулярные компоненты, смазочно-охлаждающие средства.

**Uyheliy A.Yu. Thermooxidative Destruction of Polymers in the Presence of Components in Lubricating Cooling Technological Environments Mediums**

Some researches results connected with thermooxidative destruction of polymers in the presence of various components of the lubricating cooling process fluids (LCTE) and the study of kinetic patterns and its decomposition are presented. Thermooxidative destruction of epichlorinated polyamide and polyacrylamide in the presence of oxyethylated of alcohol and water is investigated by the TGA and DTA methods. Some temperature and kinetic patterns of thermal decomposition processes of compositions of cooling lubricating technological substances which may be successfully used for scientific forecasting of highly scientific technological media are installed.

**Keywords:** polymer, thermooxidative destruction, low molecular weight components, lubricating cooling technological environment medium.

УДК 684.4.04

*Директор С.М. Кульман, канд. техн. наук – ПП "Компанія ІНТЕРДИЗАЙН"*

**ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ДЕРЕВИНИ ТА ДЕРЕВНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ЇХ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Запропоновано модель деградації деталей із деревини та деревних матеріалів під час циклічного навантаження. Запропоновано функцію дисипації під час деградації деревних матеріалів при втомному руйнуванні. Модель деградації матеріалу може слугувати основою методики прогнозування довговічності деталей із деревних матеріалів. Наведено аналіз процесів, які відбуваються у структурно-неоднорідному середовищі деталей з деревини та деревних матеріалів під час циклічного навантаження. Описано процес виробництва ентропії при дисипації вільної енергії. Визначено дисипацію енергії одиничного циклу навантаження, що дало змогу сформулювати поняття загального питомого виробництва ентропії в процесі деградації матеріалу.

**Ключові слова:** ентропія, втома, довговічність, деградація.

**Актуальність роботи.** Широке використання композиційних матеріалів у різних галузях промисловості, особливо в умовах підвищеного впливу руйнів-

них факторів, призводить до необхідності дослідження їх характеристик на міцність, для контролю руйнування та прогнозування ресурсу довговічності.

**Аналіз останніх досліджень.** У роботах [1, 2] досліджено тривалу міцність композиційних матеріалів на основі деревини під дією постійного термомеханічного навантаження. У роботах [2, 3] 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 диференційних рівнянь, наведеної у роботі [4], полягає у тому, що вона не враховує теплообміну цієї системи з термостатом, оскільки зміна температури навантаженого тіла постійною зовнішньою силою, згідно з розрахунками за моделлю, склала малу величину, якою можна знехтувати. Температура під час деформації коливалася із амплітудою, що не перевищує  $\Delta T = 0,002$  К.

Для роботи більшості конструкційних матеріалів характерна періодична зміна напруження та деформації. Прогнозування їх працездатності, а інколи шляхи підвищення, відрізняються від способів та методів, що застосовуються для короткочасних або тривалих статичних навантажень. У разі втомного руйнування інтегральний критерій життєвого циклу (загальний ресурс довговічності системи) повинен враховувати поступову деградацію матеріалу та містити дисипативну функцію процесу.

Відомий спосіб визначення ресурсу машин і деталей машин заснований на вимірюванні площі петлі гістерезису, що є мірою накопичення втомних пошкоджень під час циклічних навантажень. Оцінювання ступеня втомних руйнувань складається при цьому у порівнянні площі петлі гістерезису на початку прикладання циклічного навантаження та після роботи деталі [5]. Однак цей спосіб відрізняється великою трудомісткістю безпосереднього вимірювання площі петель гістерезису у процесі експлуатації деталей під час навантаження.

Ресурс деталі можна визначити залежністю площі петлі гістерезису від числа циклів навантаження, а площа петлі гістерезису визначається внутрішнім розсіюванням (дисипацією) енергії у матеріалі деталі, що призводить до її нагрівання. Тому замість залежності площі петлі гістерезису можна використовувати залежність внутрішнього розсіювання енергії, яка у цьому випадку пропорційна кількості виробленої ентропії залежно від числа циклів, цим самим прогнозувати ресурс деталі до моменту руйнування.

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

**Методика проведення дослідження** 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 і зворотні ефекти.

**Результати дослідження.** Пружність полімерних матеріалів має нерівноважний характер. Під час циклічного навантаження відбуваються механічні

втрата, що спричиняють тепловиділення у всьому об'ємі зразка, тобто його саморозігрів. Процеси, що відбуваються під час втомного деформування, є незворотними. Та можуть бути пояснені на основі першого та другого законів термодинаміки стосовно до системи, властивості якої безперервні у просторі та часі. Відповідно до першого закону термодинаміки, загальна кількість енергії  $U$  у довільному контрольованому об'ємі може змінитися тільки, якщо енергія надходить у (або із) контрольованого об'єму через його границі

$$dU = dQ - dW, \quad (1)$$

де  $Q$  та  $W$  – тепловий потік та робота через кордони контрольованого об'єму.

З точки зору конкретної кількості теплового потоку та роботи, закон збереження енергії для контрольованого об'єму можна записати у такому вигляді:

$$\rho \frac{du}{dt} = -\text{div} J_q + \sigma D_\varepsilon, \quad (2)$$

де:  $\rho$  – щільність;  $u$  – питома внутрішня енергія;  $J_q$  – тепловий потік через границі об'єму;  $\sigma$  – симетричний тензор напруження;  $D_\varepsilon$  – симетричний тензор швидкостей деформації.

Другий закон термодинаміки (нерівність Клаузіуса-Дюгема) постулює, що швидкість генерації ентропії завжди більша або дорівнює відношенню швидкості нагріву до температури  $T$ :

$$\rho \frac{ds}{dt} \geq -\text{div} \frac{J_q}{T}, \quad (3)$$

де  $s$  – питома ентропія. Праву частину рівняння (3) можна записати у вигляді

$$\text{div} \frac{J_q}{T} = \frac{\text{div} J_q}{T} - J_q \frac{\text{grad} T}{T^2}. \quad (4)$$

Підставляючи рівняння (4) у рівняння (3) та замінюючи  $\text{div} J_q$  з рівняння (2), отримаємо:

$$\rho \frac{ds}{dt} + \left( \sigma D_\varepsilon - \rho \frac{du}{dt} - J_q \frac{\text{grad} T}{T} \right) \frac{1}{T} \geq 0. \quad (5)$$

Нехай  $\Psi$  – питома вільна енергія та визначається як

$$\Psi = u - Ts. \quad (6)$$

Диференціюючи рівняння (6) за часом, та розділивши результат на температуру  $T$ , отримаємо:

$$-\left( \frac{d\Psi}{dt} + s \frac{dT}{dt} \right) \frac{1}{T} = \frac{ds}{dt} - \frac{1}{T} \frac{du}{dt}. \quad (7)$$

Комбінуючи рівняння (3) і (7) та нерівності (3) і (5), отримаємо:

$$\left( \sigma B - \rho \left( \frac{d\Psi}{dt} + s \frac{dT}{dt} \right) - J_q \frac{\text{grad} T}{T} \right) \frac{1}{T} \geq 0. \quad (8)$$

У разі малих деформацій, тензор швидкості деформації  $D$  можна замінити на загальну деформацію. Загальну деформацію надамо у вигляді суми пластичної та пружної деформації:

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_e. \quad (9)$$

Термодинамічний потенціал у вигляді вільної питомої енергії  $\Psi$  повинен бути вигнутий за температурою  $T$  та опуклим по інших змінних. Крім цього, потенційна функція  $\Psi$  залежить від зовнішніх та внутрішніх змінних:

$$\Psi = \Psi(\varepsilon, T, \varepsilon_p, \varepsilon_e, V_k), \quad (10)$$

де  $V_k$  може бути будь-якої внутрішньої змінною.

Посилаючись на рівняння (9), деформацію можна подати у вигляді  $\varepsilon - \varepsilon_p = \varepsilon_e$ , отже, рівняння (10) має такий вигляд:

$$\Psi = \Psi(T, \varepsilon - \varepsilon_p, V_k) = \Psi(T, \varepsilon_e, V_k). \quad (11)$$

Швидкість питомої вільної енергії можна записати у вигляді

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon_e} \varepsilon_e + \frac{\partial \Psi}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \Psi}{\partial V_k} \frac{\partial V_k}{\partial t}. \quad (12)$$

Після підстановки рівняння (12) у рівняння (8), отримуємо:

$$\left( \sigma \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon_e} \varepsilon_e + \sigma \varepsilon - \rho \left( \frac{\partial \Psi}{\partial T} + s \right) \frac{\partial T}{\partial t} - \rho \frac{\partial \Psi}{\partial V_k} \frac{\partial V_k}{\partial t} - J_q \frac{\text{grad} T}{T} \right) \frac{1}{T} \geq 0. \quad (13)$$

Для малих деформацій, відповідно до законів термопружності, можна записати:

$$\sigma = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon_e}, \quad (14)$$

$$s = -\rho \frac{\partial \Psi}{\partial T}. \quad (15)$$

Конструктивні закони рівнянь (14) та (15) виникають від виконання негативних нерівностей (13). Визначимо термодинамічні сили, пов'язані з внутрішніми змінними наступним так:

$$A_k = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial V_k}. \quad (16)$$

Оскільки нерівність Клаузіуса-Дюгема (3) відображає той факт, що величина питомої виробництва ентропії є істотно позитивною:

$$\frac{d_i s}{dt} = \frac{\sigma \varepsilon}{T} - A \frac{dV_k}{dt} \frac{1}{T} - J_q \frac{\text{grad} T}{T^2} \geq 0. \quad (17)$$

Рівняння (17) можна розглядати також як добуток узагальнених термодинамічних сил  $X_i = \left\{ \frac{\sigma}{T}, \frac{A_k}{T}, \frac{\text{grad} T}{T^2} \right\}$  та узагальнених швидкостей процесів, що відбуваються, або термодинамічних потоків  $J_i = \{ \varepsilon_p, -V_k, -J_q \}$ :

$$\frac{d_i s}{dt} = \sum_i X_i J_i. \quad (18)$$

Нерівноважна термодинаміка визначає, як термодинамічні сили  $X_i$ , керують потоками  $J_i$ . Кожен із потоків залежить від будь-якої із сил, або інтенсивних величин (наприклад температури  $T$ ), пов'язаних із дисипативними процесами під час деформації.

Рівняння (17), (18) описують процес виробництва ентропії, який складається по-перше, із розсіювання (дисипації) енергії внутрішнього тертя, в'язкопружної та пластичної деформації; по-друге, невідновлюваної вільної енергії, що зберігається у матеріалі; і нарешті, розсіювання тепла за рахунок теплопровідності. Для багатьох деревних матеріалів невідновлювальна енергія становить тільки 5-10 % від виробництва ентропії внаслідок механічного розсіювання, що дає змогу виконати спрощення:

$$A_k \frac{\partial V_k}{\partial t} \frac{1}{T} \approx 0. \quad (19)$$

Таким чином, рівняння (19) зводиться до такого вигляду:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\sigma \varepsilon_p}{T} - J_q \frac{gradT}{T^2} \geq 0. \quad (20)$$

Перший та другий закони термодинаміки, питома вільна енергія, описана у рівняннях (2), (6), і (8), а також закон Фур'є ( $J_q = -k \cdot gradT$ ) дають змогу прийти до такого термомеханічного рівняння:

$$k \cdot \nabla^2 T = \rho \cdot C_p \frac{dT}{dt} - \sigma : \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial t} - T \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial \varepsilon_e}{\partial t}, \quad (21)$$

де:  $k$  – теплопровідність;  $C_p$  – теплоємність.

Рівняння (21) виражає енергетичний баланс між чотирма її членами: передача тепла термостата за рахунок теплопровідності ( $k \cdot \nabla^2 T$ ); ефект уповільнення передачі тепла внаслідок теплової інерції ( $\rho \cdot C_p \frac{dT}{dt}$ ); внутрішня генерація теплового потоку, що складається із роботи внутрішнього тертя, в'язкопружної і пластичної деформації, що перейшла у тепло ( $W_p = \sigma : \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial t}$ ), яка головним чином відповідає за підвищення середньої температури; та зміна (коливання) температури відносно її середнього значення під час циклічного деформування внаслідок термопружного ефекту,  $W_e = T \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial \varepsilon_e}{\partial t}$ .

Оскільки коливання температури, зумовлені термопружним ефектом, є незначні порівняно із зростанням середньої температури, то виробленням тепла за рахунок роботи пружної деформації  $W_e$  можна знехтувати. Отже, рівняння (21) можна спростити

$$k \cdot \nabla^2 T = \rho \cdot C_p \frac{dT}{dt} - W_p, \quad (22)$$

а рівняння (20) подати у вигляді

$$\frac{ds}{dt} = \frac{W_p}{T} - J_q \frac{gradT}{T^2} \geq 0. \quad (23)$$

Таким чином загальна, сумарна величина ентропії втомного руйнування (ЕВР) може бути отримана шляхом інтегрування рівняння (23):

$$S_{f=} \int_0^{t_f} \left( \frac{W_p}{T} - J_q \frac{gradT}{T^2} \right) dt, \quad (24)$$

де  $S_f$  – ентропія втомного руйнування (ЕВР).

Тобто у рівноважній теорії еволюція нерівноважної системи задається нерівністю Клаузіуса, яке цим самим виконує роль динамічного рівняння. Для опису термодинамічних процесів у суто нерівноважних системах (в яких граничні умови перешкоджають встановленню термодинамічної рівноваги) необхідно трансформувати нерівність Клаузіуса у динамічні рівняння нерівноважних процесів. Для цього професор І. Пригожин у прирості ентропії  $dS$  запропонував виділити два члена [6]:

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (25)$$

де:  $d_e S$  – визначається кількістю поглинання системою тепла (тобто характеризує ентропію отриману системою ззовні;  $d_i S$  – надлишок ентропії, що вироблена незворотними процесами у самій системі. Згідно з нерівністю Клаузіуса,  $d_i S \geq 0$  або поклавши  $d_i S = (d_i S / dt) dt$  маємо:  $d_i S / dt \geq 0$ . Величина  $d_i S / dt$  є виробництво ентропії. Найбільш істотним моментом є те, що внесок у виробництво ентропії дають тільки незворотні процеси.

Отже, у системах, всередині яких протікають фізичні, хімічні, біологічні процеси, завжди виробляється ентропія. Це виробництво відбувається з певною швидкістю  $\frac{d_i S}{dt} \geq 0$ , де рівність нулю відповідає умові рівноваги.

Виробництво ентропії за одиницю часу  $\frac{d_i S}{dt}$  в одиниці об'єму відкритої

системи дорівнює  $D$  за визначенням, тобто:  $D = \frac{d_i S}{dt dV}$ . Отже,  $\frac{d_i S}{dt} \equiv \int D dV \geq 0$ .

Визначимо функцію дисипації для нашого випадку у такому вигляді:  $D = \frac{dW}{dt} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$ , де  $\frac{dW}{dt}$  – це потік енергії ззовні всередину системи, тоді як рушійна сила цього потоку у виробництві ентропії є градієнтом температури ( $1/T_0 - 1/T$ ), що виникає у процесі деформації між активаційним об'ємом та термостатом. При цьому  $W$  є енергією, що припадає на одиницю об'єму.

Таким чином, загальне питома виробництво ентропії втомного руйнування аж до повного руйнування може бути визначено:

$$S \rho = \int_0^{t_p} \frac{dW}{dt} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) dt = DN \rho = \frac{f \sigma^2}{2E} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) N \rho, \quad (26)$$

де:  $S \rho$  – загальна питома кількість ентропії, що вироблена під час циклічного навантаження за весь час до руйнування,  $\left[ \frac{Дж}{м^3 \cdot К} \right]$ ;  $D = \frac{f \sigma^2}{2E} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$  – дисипація енергії одиничного циклу навантаження,  $Дж/(м^3 \cdot К)$ ;  $t_p$  – час до руйнування,

с;  $W = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2} = \frac{\sigma^2}{2E}$  – питома робота під час деформації за один цикл навантаження, у зоні максимальних внутрішніх напружень та деформацій,  $\sigma_{max}$ ,  $\varepsilon_{max}$ ,  $Дж/м^3$ ;  $f$  –

частота циклічного навантаження (крім цього, вона визначає швидкість деформації, а отже швидкість дисипації),  $c^{-1}$ ;  $T$  – температура саморозігріву в активаційному об'ємі, у зоні максимальних внутрішніх напружень під час циклічного деформування із заданими параметрами ( $f, \sigma_{\max}$ ),  $K$ ;  $N_p = t_p / f$  – число циклів до руйнування;  $T_0$  – температура термостата,  $K$ ;  $\sigma_{\max}$  – максимальні внутрішні напруження в активаційному об'ємі, МПа;  $E$  – модуль пружності, МПа.

Причому ресурс вважається вичерпаним в разі досягнення числа циклів, що визначається за формулою

$$[N_i] = k \frac{S_p}{D_i}, \quad (27)$$

де:  $k = 0,5 \dots 0,6$  – коефіцієнт запасу;  $[N_i]$  – гранично допустима кількість циклів навантаження за заданих параметрів циклічного навантаження ( $f_i, \sigma_{i \max}, \varepsilon_{i \max}$ ), та за температури саморозігріву,  $T_i$ ;  $D_i$  – дисипація енергії одиничного циклу навантаження за конкретних умов експлуатації  $D_i(f_i, \sigma_{i \max}, T_i, T_0)$ .

Багато дослідників зазначили, що під час проведення досліджень на втомному деревині було помічено значне зростання температури у зоні надлому (руйнування) під дією циклічного навантаження. Великого значення цьому факту не надавали, вважалося, що "...вимірювання температури не може служити прискореним методом для визначення границі тривалості деревини" [7]. Однак результати наших експериментів дають змогу по-новому трактувати явище підвищення температури під час циклічного навантаження деревинних матеріалів.

**Результати натурального експерименту.** Зразки із вільхи, перерізом  $25,5 \times 9,5$  мм закріплювалися консольно на спеціальній установці. Вільний кінець консолі сприймав циклічне навантаження. Зміна величин внутрішніх напружень виконувалася зміною довжини консолі при постійній величині амплітуди коливань. Межа міцності при згині та модуль пружності визначався за стандартною методикою. Для цього установку із зразком встановлювали на розривну машину Р-5 при параметрах:  $[\sigma_{\text{л}}] = 83,4$  МПа,  $E = 6810$  МПа. Вимірювання температури відбувалося термопарами, що знаходилася на зовнішній поверхні консолі у місцях її жорсткою закріплення. Температуру реєстрували на комп'ютері через кожних 10 с. Коливання відноліві (ГОСТ 23207 "Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения").

Табл. Змінні фактори та результати експериментів

№	Максимальна напруга в активаційному об'ємі при згині, $\sigma$ , МПа	Частота коливань, $f$ , Гц	Температура термостата, $T_0$ , °К	Температура в зоні максимальних напружень в стаціонарному стані, $T$ , °К	Число циклів до руйнування, $N_p$	Питома ентропія втомного руйнування вільхи, $Sp$ , [MJ/m <sup>3</sup> · К]
1	2	3	4	5	6	7
1	38,8	1,3	293	298	3,59E+05	2,999
2	38,8	2,7	293	301	1,13E+05	2,985
3	47,9	4,0	293	305	3,33E+04	3,015
4	47,9	5,3	293	308	2,02E+04	2,896
5	60,7	6,6	293	313	7,66E+03	3,112
6	60,7	8	293	316	5,61E+03	2,986

У таблиці наведені умови та результати експериментів. Підвищення температури показано у зоні стиску.

На підставі даних таблиці побудовано графіки залежності підвищення температури за різних параметрів навантаження (рис. 1, 2).

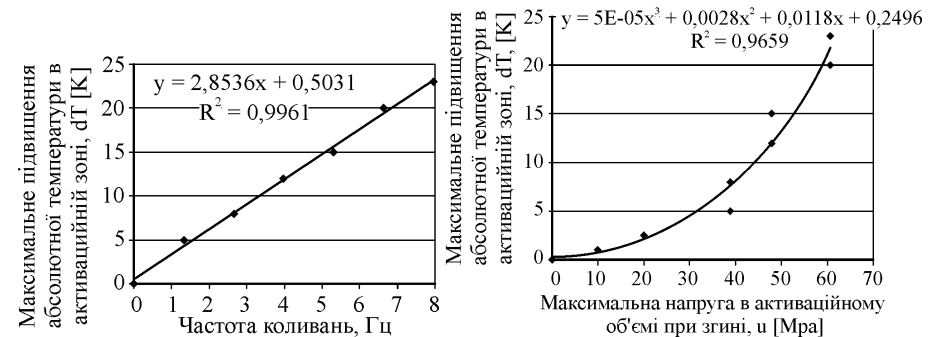


Рис. 1. Графік залежності максимального підвищення абсолютної температури в активаційній зоні від частоти коливань

Рис. 2. Графік залежності максимального підвищення абсолютної температури в активаційній зоні від максимального напруження в активаційному об'ємі

Графік залежності загальної питомої ентропії, що вироблена у процесі втомного руйнування вільхи, наведено на рис. 3.

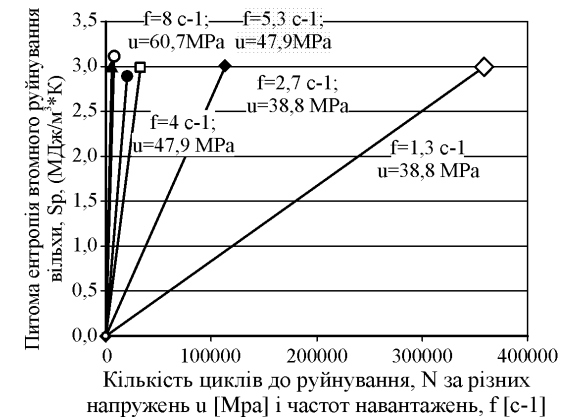


Рис. 3. Графік залежності загальної питомої ентропії виробленої у процесі втомного руйнування вільхи

Як випливає із таблиці, обидва фактори – внутрішні напруження та частота коливань істотно впливають на підвищення температури. Крім цього, встановлено, що питома ентропія втомного руйнування не залежить від умов навантаження, а залежить тільки від властивостей матеріалу.

Загальний характер зміни температури у зоні дії максимальних напружень (наприклад у зоні жорсткого закладення консолі) у машинному та натурному експериментах, дозволило зробити висновок, що для кожного матеріалу

існує своя температура його максимального розігріву, за даних умов навантаження. Ці умови визначаються обмеженим числом керуючих параметрів, (максимальні напруження та частота, тобто швидкість зміни напруження в активційному об'ємі), що переводять динамічну систему при опорі втоми, в область сталого граничного циклу, аттрактора.

Запропоновано спосіб прогнозування ресурсу, що ґрунтується на парадигмі сталості величини накопиченого виробництва ентропії до моменту руйнування,  $S_p$ . Тобто, іншими словами, сталості запасу виробництва ентропії. А це передбачає, що термодинамічні умови, пов'язані з виробництвом ентропії, тобто умови деградації матеріалу, залишаються ідентичними у процесі опору матеріалу втоми, та залежать тільки від часу. Тобто руйнування відбувається у момент, коли вичерпається весь запас ентропії. У межах проведених натурних випробувань виявлено, що питома ентропія втомного руйнування (УЕВР) залежить тільки від дисипативних властивостей матеріалу та не залежить від навантаження, частоти і розмірів деталі. Таким чином, тривалість процесу опору матеріалу втоми, тобто його деградація, може бути визначена, якщо відома питома ентропія втомного руйнування цього матеріалу.

Наприклад, для прогнозування гранично допустимого числа циклів навантаження для деталей із деревини вільхи на опір втоми, спосіб реалізували таким чином. Деталь з вільхи розміром  $25 \times 9,5 \times 160$  мм експлуатується в умовах нульового циклічного навантаження при її жорсткому консольному закріпленні. Максимальні напруження у деталі складають  $\sigma_{\max} = 10 \text{ МПа}$ , частота нульових коливань вільного кінця консолі  $f = 1 \text{ Гц}$ . Температура навколишнього середовища (термостата) дорівнює  $T_0 = 293^\circ\text{К}$ . Під час роботи деталі, при переході її у новий стаціонарний стан температура у зоні кріплення піднімається до  $T = 298^\circ\text{К}$ . Модуль пружності матеріалу  $E = 8410 \text{ МПа}$ . Під час попередньо проведених випробувань визначено величину питомої ентропії втомного руйнування вільхи, яку наведено у табл.

Вона склала величину рівну  $S_p = 2,999^{+0,011} \text{ МДж} / \text{м}^3 \cdot \text{К}$ . Користуючись рівнянням (26), визначаємо допустиме число циклів навантаження за коефіцієнта запасу  $k = 0,8$ :

$$[N_i] = k \frac{S_p}{D_i} = k \frac{S_p}{f \sigma^2 \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} = 0,8 \frac{2999000}{2 \cdot 8410000000 \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{298} \right)} = 1,3 \cdot 10^6.$$

**Висновки.** На основі парадигми деградації матеріалу при його опорі втоми, можна проводити прискорені втомні випробування за рахунок підвищення швидкості процесу деградації  $J_i$  за збереження еквівалентних термодинамічних сил  $X_i$ , щоб отримати ту ж послідовність фізичних процесів, в однакових пропорціях, але із більшою інтенсивністю. Наприклад, за рахунок збільшення частоти прикладеного циклічного навантаження, швидкість деградації матеріалу збільшується, а тривалість випробувань відповідно буде зменшуватися. Це дає змогу значно знизити час випробувань на опір втоми. З іншого боку, контролюючи час перебування матеріалу під навантаженням і вимірюючи при

цьому витрати ентропії втомного руйнування можна визначити гранично допустимий час роботи матеріалу.

## Література

1. Кульман С.М. Нелінійні ефекти деформування і руйнування композиційних матеріалів на основі деревини / С.М. Кульман // Науковий вісник НУБіП України : зб. наук. праць. – Сер.: Лісівництво та декоративне садівництво. – К. : Вид-во НУБіП України. – 2011. – Вип. 164, ч. 1. – С. 250-255.
2. Кульман С.М. Нелінійна динаміка деформування та руйнування композиційних матеріалів на основі деревини / С.М. Кульман // Науковий вісник НУБіП України : зб. наук. праць. – Сер.: Лісівництво та декоративне садівництво. – К. : Вид-во НУБіП України. – 2012. – Вип. 171, ч. 2. – С. 200-207.
3. Кульман С.М. Кінетика тривалої міцності композиційних матеріалів на основі деревини / С.М. Кульман // Сучасні проблеми збалансованого природокористування : зб. наук. праць до VI наук.-практ. конф. – Кам'янець-Подільський : Вид-во ПДАТУ, 2011. – Спецвип. – С. 196-206.
4. Кульман С.М. Нелінійна динамічна модель деформування та руйнування композиційних матеріалів на основі деревини / С.М. Кульман // Науковий вісник НУБіП України : зб. наук. праць. – Сер.: Лісівництво та декоративне садівництво. – К. : Вид-во НУБіП України. – 2013. – Вип. 185, ч. 2. – С. 312-319.
5. Одинг И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов / И.А. Одинг. – М. : Изд-во "Машиностроение", 1962. – 350 с.
6. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М. : Изд-во "Мир", 2009. – 461 с.
7. Белянкі Ф.П. Міцність деревини під впливом повторного навантаження : монографія / Ф.П. Белянкі. – К. : Вид-во АН України, 1936. – 120 с.
8. Петров В.А. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов / В.А. Петров, А.Я. Башкарев, В.И. Веттергенъ. – СПб. : Изд-во "Политехника", 1993. – 475 с.

## Кульман С.Н. Прогнозирование долговечности деталей из древесины и древесных материалов при их циклической нагрузке

Предложена модель деградации деталей из древесины и древесных материалов при их циклической нагрузке. Предложена диссипативная функция при деградации древесных материалов при усталостном разрушении. Модель деградации материала может служить основой методики прогнозирования долговечности деталей из древесных материалов. Приведен анализ процессов, происходящих в структурно-неоднородной среде деталей из древесины и древесных материалов при циклической нагрузке. Описывается процесс производства энтропии при диссипации свободной энергии. Определена диссипация энергии единичного цикла нагрузки, что позволило сформулировать понятие общего удельного производства энтропии в процессе деградации материала.

**Ключевые слова:** энтропия, усталость, долговечность, деградация.

## Kulman S.N. Predicting Durability of Details from Wood and Wood Materials under Cyclic Loading

A model of degradation of details from wood and wood materials under cyclic loading is proposed. A dissipative function with degradation of wood materials in fatigue failure is offered. The model of degradation of the material can serve as a basis for predicting techniques durability of details from wood materials. The analysis of the processes that occur in structurally inhomogeneous medium details of wood and wood materials during cyclic loading is made. The process of entropy production like the dissipation of free energy is described. A dissipation power cycle of the unit load, allowing formulating general concept of specific entropy production in the degradation of the material is determined.

**Keywords:** entropy, fatigue, durability, degradation, detail.