

doi: 10.33249/2663-2144-2019-85-12-67-74

UDC 684.4.04

FORECASTING DURABILITY OF WOOD COMPOSITES BASED ON ACCELERATED TESTS

S. Kulman, L. Boiko, Ya. Bugaenko, Yo. Zagursky

e-mail: s_kulman@ukr.net

Zhytomyr National Agroecological University,
7, Staryi Blvd, Zhytomyr, 10008, Ukraine

Long-term strength and durability tests are long and laborious, therefore new accelerated test methods are constantly being offered. The aim of this study is to develop a method for predicting durability based on data obtained from standard short-term tests for bending strength. The forecasting method is based on the kinetic concept of the strength of solids.

The experiments were carried out on samples of structural chipboards based on urea-formaldehyde resin. The significance level for the tensile strength and time to failure in the studied temperature range from 273 to 353 °K, as well as for the loading speed from 0.81 to 98.25 mm/min, was less than 0.05, which indicates that the influence temperatures and strain rates are statistically significant.

The results showed that temperature had a more significant effect on the tensile strength than the strain rate. At the same time, their effect on the time to failure is almost the same. Studies have confirmed the hypothesis of a non-linear reaction of wood composites to external thermo-moisture-force effects. The reason for the nonlinearity is the result of the interaction of variable factors with each other, but this requires special further study.

The created technique allows to significantly reduce the time required for testing. The data presented in the work allow us to verify the proposed mathematical model that describes the change in the long-term strength of composite materials on wood fillers (wood composites), as well as assess the influence of external factors on the strength characteristics of the composite during production and operation.

Key words: wood boards, durability prediction, durability indicators, accelerated tests.

ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕРЕВНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПРИСКОРЕНИХ ВИПРОБУВАНЬ

С. М. Кульман, Л. М. Бойко, Я. П. Бугаєнко, Й. В. Загурський

e-mail: s_kulman@ukr.net

Житомирський національний агроекологічний університет,
бульвар Старий, 7, м. Житомир, 10008, Україна

Випробування на довготривалу міцність і довговічність є тривалими і трудомісткими, тому постійно пропонуються нові прискорені методи випробувань. Метою даного дослідження є розробка методу прогнозування довговічності на основі даних, отриманих за стандартних короткочасних випробувань на згинальну міцність. Метод прогнозування заснований на кінетичній концепції міцності твердих тіл. Експерименти проводилися на зразках з конструкційних деревинно-стружкових плит на основі карбамидоформальдегідної смоли. Рівень значущості для межі міцності і часу до руйнування в досліджуваному діапазоні температур – від 273 до 353 °K, а для швидкості навантаження – від 0,81 до 98,25 мм/хв був менше ніж $p = 0,05$, що вказує на те, що вплив температури і швидкості деформації є статистично значущими.

Результати показали, що температура зробила більш істотний вплив на межу міцності, ніж швидкість деформування. У той же час, їх вплив на час до руйнування практично однаковий. Дослідження підтвердили гіпотезу про нелінійні реакції деревних композитів на зовнішні термовологосилові дії. Причиною нелінійності є результат взаємодії змінних факторів між собою,

проте це вимагає спеціального подальшого вивчення. Створена методика дозволяє значно скоротити час, необхідний для тестування. Наведені в роботі дані дозволяють верифікувати запропоновану математичну модель, що описує зміну довготривалої міцності композиційних матеріалів на деревних наповнювачах (деревних композитів), а також оцінити вплив зовнішніх факторів на характеристики міцності композиту у процесі виробництва і експлуатації.

Ключові слова: деревні плити, прогнозування довговічності, показники довговічності, прискорені випробування.

Вступ

Останнім часом в житловому будівництві стали широко використовуватися композиційні матеріали на деревних наповнювачах, деревні композити (ДК), такі, наприклад, як деревно-стружкові плити (ДСП) і деревно-волокнисті плити (МДФ). Для такого використання важлива довговічність ДК. Оцінка того, як довго панелі зберігають необхідні характеристики в реальних умовах навколишнього середовища, була метою багатьох досліджень, які оцінюють довговічність ДК.

Методи оцінки довговічності деревних плит включають в себе довгострокові і короткострокові випробування. Довгострокова оцінка, така як тести впливу на вулиці, є метод оцінки тривалих періодів часу з урахуванням фактору минулого часу (May & Cunha, 1999). Проте, випробування на вплив на відкритому повітрі мають багато недоліків, таких як тривалість і складність проведення. Крім того, ці тести впливають на відмінності, викликані місцем проведення тесту (Leicester, 1971; Ranta-Maunus, 1975). Навпаки, короткострокові оцінюють зміни в механічних властивостях після прискорених процедур старіння, таких як занурення у воду, кип'ятіння, пропарювання, заморожування або сушка (Hann et al., 1962; River, 1994; Okkonen & River, 1996). Випробування на прискорене старіння перевершують короткострокові випробування на відкритому повітрі, і вони важливі для визначення довговічності деревних плит.

Такі прискорені тести на старіння можуть здатися штучними, але в останні десятиліття було зроблено багато спроб співвіднести деградацію, викликану старінням на відкритому повітрі, з деградацією, викликану прискоренням в лабораторії, включаючи використання ASTM D1037, APA D-1 і випробування D-4 і V313, оскільки результати випробувань на старіння на відкритому повітрі іноді використовуються в якості основних показників при визначенні

стандартизованих методів випробувань (Dinwoodie, 1981; Okkonen & River, 1996).

Дослідження властивостей ДК зазвичай засновані на принципі суперпозиції Больцмана, який описує реакцію матеріалу на різні історії навантаження (ASTM D 1037-99; Liu et al., 2015). Принцип суперпозиції Больцмана говорить, що відгук матеріалу на дане навантаження не залежить від відгуку матеріалу на будь-яке навантаження, яке вже є на матеріалі (Ito et al., 2018). Деформація зразка прямо пропорційна прикладеній нарузі, коли всі деформації порівнюються з еквівалентним часом. Однак, принцип не враховує взаємний вплив зовнішніх чинників і він справедливий тільки в лінійній пружної області (Yu & Zhou, 2016).

Попередні дослідження показали значну залежність міцності і жорсткості ДК від температури і вологості матеріалу (Kulman et al., 2017). В цьому випадку феноменологічні залежності були отримані у вигляді формул, що пов'язують ці величини, на основі яких можна прогнозувати зміну міцності за зміни умов їх експлуатації.

У той же час, при прогнозуванні довговічності цих матеріалів на основі кінетичної теорії міцності твердого тіла (Regel et al., 1974) в канонічну формулу С. М. Журкова, або в уточнену формулу Журкова-Ратнера, входить тільки температура. Спроба використовувати модель Журкова-Ратнера для композиційних матеріалів на основі деревини призвела до того, що вплив вологості було враховано шляхом введення додаткових поправок, визначених у результаті тривалих експериментів (Ratner & Yartsev, 1992). Однак, практичне використання кліматичних поправок показало, що їх застосування обмежене тільки діапазоном допустимих значень зовнішніх факторів.

Одна з теорій міцності була сформульована Гріффітссом. Відповідно до цієї енергетичної теорії, міцність була визначена як напруга, за якої виконується умова рівності двох енергій: енергії, яка витрачається на утворення нової поверхні

зростаючої тріщини, і пружної енергії, яка виділяється, коли тріщина зростає. Відповідно до цієї теорії, руйнування розглядається як критична подія, яка відбувається за критичної напруги.

Така інтерпретація не підтверджується досвідом, так як відомо, що освіта і накопичення молекулярних і надмолекулярних дефектів відбувається задовго до часу руйнування (Rabindra, 2013). Отже, руйнування розвивається в часі і не є критичною подією. Введення шкали часу процесу руйнування сприяло створенню кінетичної теорії міцності. Витоки цієї теорії відносяться до робіт фізико-технічного інституту ім. А. Ф. Іоффе РАН, які були виконані в середині минулого століття. Запропоновано залежності від часу при описі релаксаційних властивостей за в'язкопружної деформації твердих тіл у вигляді узагальнених рівнянь Максвелла. Фундаментальною формою кінетичної теорії міцності є рівняння Журкова (Zhurkov, 1965):

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

де τ – довговічність за температури T і навантаженні σ ; U_0 і γ – параметри рівняння, які мають простий фізичний зміст.

Кінетична теорія заснована на ідеї розпаду хімічного зв'язку як теплового процесу Больцмана, який активується механічною напругою σ . В цьому випадку U_0 розуміється як енергія активації процесу (вона повинна дорівнювати енергії розриву хімічного зв'язку, так як це період коливань хімічно пов'язаних атомів (значення становить близько 10^{-12} ... 10^{-13} с⁻¹). Якщо σ – це напруга на молекулу, то $\gamma\sigma$ – це

$$\lg \tau_m = (\lg \tau_3 (\lg \tau_2 - \lg \tau_4) - \lg \tau_4 (\lg \tau_1 - \lg \tau_3)) / (\lg \tau_2 - \lg \tau_4 - \lg \tau_1 + \lg \tau_3);$$

$$x_1 = 1000/T_1, \quad x_2 = 1000/T_2; \quad \gamma = (U_1 - U_2) / (\sigma_1 - \sigma_2);$$

$$U_1 = 2,3R(\lg \tau_1 - \lg \tau_2) / (T_1^{-1} - T_2^{-1}); \quad U_2 = 2,3R(\lg \tau_3 - \lg \tau_4) / (T_3^{-1} - T_4^{-1});$$

$$U_0 = \gamma\sigma_2 + U_2,$$

де τ_i , σ_i , T_i – час руйнування, напруги і температура при випробуваннях i -го зразка.

Однак, оскільки термоактиваційні параметри під час використання даного способу визначаються шляхом випробувань на тривалу міцність за постійного навантаження, то, відповідно, трудомісткість способу велика.

Метою даного дослідження є оцінка довговічності деревних плит з використанням результатів прискорених випробувань на вигин.

механічно індуковане зменшення енергії розривної зв'язку, а γ – коефіцієнт перетворення механічного зв'язку в енергію, тоді τ – це час очікування розпаду молекули, тобто час очікування флуктуації енергії $E_f = (U_0 - \gamma\sigma)$ для цих дій.

У формулі (1) був фізично обґрунтований четвертий параметр для полімерних матеріалів, після чого вона набула такого вигляду (Ratner & Yartsev, 1992):

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

де τ_m , U_0 , γ і T_m – фізичні (термоактиваційні) матеріальні параметри (ТАПи): τ_m – мінімальна довговічність (період коливань кінетичних одиниць – атомів, груп атомів, сегментів) з; U_0 – максимальна енергія активації руйнування, кДж • моль; γ – структурно-механічні параметри, кДж/(моль • МПа); T_m – температурний межа наявності твердого тіла (температурна деградація), К; R – універсальна газова стала, кДж/(моль • К); τ – час руйнування (довговічності) с; σ – напруга, МПа; T – температура, °К.

Традиційні методи визначення ТАП у сучасній науці про матеріали досі використовують графоаналітичні способи для їх визначення. Однак вони досить трудомісткі і недостатньо точні. У зв'язку з цим, ми запропонували більш точний, аналітичний спосіб визначення ТАП (Патент України №46493, 2009). Відповідно до цього методу випробування на довговічність проводяться за спеціальним планом, а ТАПи розраховуються за формулами:

Основні результати вивчення довговічності ДК у меблевих конструкціях викладені в статті (Kulman et al., 2019). Метою даної роботи є створення прискореної методології оцінки довготривалої міцності композиційних матеріалів на основі деревини з урахуванням впливу зовнішніх впливів.

Матеріали та методи

Експерименти проводилися на зразках з конструкційних деревинно-стружкових плит на основі карбамидоформальдегідної смоли (MF PB), відповідно до EN 14322 виробництва компанії Kronospan UA Ltd. Було використано дві плити розміром (2750 мм x 1830 мм) товщиною 18 мм, які були розрізані на зразки 450 мм (довжина) x 50 мм (ширина). Перед тим як розрізати, плити зберігали у кондиціонуючій кімнаті, в якій підтримувалася температура 20 °C і відносна вологість 65 %. Випробування проводилися на базі стандартної розривної машини моделі P5-МС за методикою визначення межі міцності та модуля пружності під час згину згідно з ГОСТ 10635-88 "Плити деревостружкові. Методи визначення межі міцності і модуля пружності при вигині".

Зразки встановлювали на опори випробувального пристрою за відмітками так,

щоб поздовжня вісь зразка була перпендикулярною осям опор, а поперечна вісь перебувала в одній вертикальній площині з віссю ножа. Зразки були підготовлені і розрізані відповідно до ASTM D 1037-99. Навантаження і прогин вимірювали, а MOR і MOE розраховували відповідно до розділу 9 в ASTM D 1037-99. Швидкість переміщення рухомого захвату розривної машини приймалася рівною 1; 3; 15; 100 мм/хв і регулювалася за допомогою тиристорного приводу. Всього було виготовлено сто п'ятдесят зразків. Десять зразків були підготовлені для випробування модуля пружності (MOE) і межі міцності (MOR) перед основним випробуванням. Всі зразки зберігалися у приміщенні для кондиціонування за температури 20 °C і відносній вологості 65 % до використання. Середня щільність зразків становила 750 ± 7 кг/м³, за вологості плити МС 5 %.

Таблиця 1. Механічні властивості стружкових плит

Тип плити	Щільність ^d кг/м ³	Товщина ^d мм	MOR ^d МПа	MOE ^d МПа
MF PB ^a	750 ± 7	18.1 ± 0.1	12.1 ± 1.1	$2\ 110 \pm 29$

^a MF PB – ламінована СП.

^b Товщину, щільність, MOR і MOE вимірювали після того, як зразки досягли рівноваги за відносної вологості 65 %, температури 20°C за вологості плити 5 %.

Оскільки у формулу (2) змінні фактори входять експоненціально, вимоги до точності експериментів на довговічність повинні бути набагато вищі. Тому для отримання достовірних статистично значущих результатів у кожній серії експериментів число повторень приймалося рівним 30.

Поставлена мета вирішується тим, що у відомому способі прогнозування довговічності ДК, що полягає у руйнуванні зразків, до котрих прикладається навантаження, випробування проводять на однакових зразках за різних значень температури та різної швидкості підвищення навантаження, при цьому, фіксують час до руйнування та максимальне напруження, довговічність матеріалу визначається за формулою (2). Значення термоактиваційних параметрів визначаються на підставі результатів проведених випробувань шляхом вирішення системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{U_0}{RT_1} - \frac{U_0}{RT_m} - \gamma \frac{\sigma_1}{RT_1} + \gamma \frac{\sigma_1}{RT_m} + \ln \tau_m = \ln t_1 \\ \frac{U_0}{RT_2} - \frac{U_0}{RT_m} - \gamma \frac{\sigma_2}{RT_2} + \gamma \frac{\sigma_2}{RT_m} + \ln \tau_m = \ln t_2 \\ \frac{U_0}{RT_3} - \frac{U_0}{RT_m} - \gamma \frac{\sigma_3}{RT_3} + \gamma \frac{\sigma_3}{RT_m} + \ln \tau_m = \ln t_3 \\ \frac{U_0}{RT_4} - \frac{U_0}{RT_m} - \gamma \frac{\sigma_4}{RT_4} + \gamma \frac{\sigma_4}{RT_m} + \ln \tau_m = \ln t_4 \end{cases}, \quad (3)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ – максимальне руйнівне напруження за відповідної швидкості підвищення навантаження, МПа; T_1, T_2, T_3, T_4 – температура чотирьох серій випробувань t_1, t_2, t_3, t_4 – час до руйнування за різної швидкості навантаження та температури, с.

Оскільки дана модель (2) створена для випадку розтягування і в цьому випадку має ясний фізичний зміст, то і визначення характеристик руйнування правильно проводити шляхом випробувань на розтяг. При проведенні експериментів на машинах з постійною швидкістю руху траверси зразок відчуває лінійно

зростаюче навантаження. За такого випробування, з урахуванням принципу підсумовування пошкоджень, Бейлі:

$$\int_0^{t_p} \frac{dt}{\tau(\sigma(t))} = 1,$$

де t_p – час настання руйнування, кінетична модель дає наступне співвідношення між розривною напругою і швидкістю навантаження:

$$\sigma_p = \frac{\ln(A\alpha)}{\alpha} + \frac{1}{\alpha} \ln \dot{\sigma}, \quad (4)$$

$$A = \frac{\exp(\alpha\sigma_p)}{\alpha\dot{\sigma}}, \quad \alpha = \frac{\gamma}{RT},$$

де постійні γ і R ті ж, що і в (2). Це співвідношення дає зв'язок традиційно використовуваних механіками величин, що характеризують міцність твердих матеріалів з параметрами середовища, використаними в моделі Журкова. Таким чином, будувати методику можна, ґрунтуючись на двох підходах: за постійної напруги, ресструючи навантаження і довговічність, які пов'язані рівнянням (2), і за постійної швидкості навантаження з ресстрацією розривного зусилля, які пов'язані рівнянням (4). У додатку до ДК перевага має спосіб випробувань під дією зростаючого навантаження. Пояснюється це тією обставиною, що за проведення випробувань на тривалу міцність за постійної напруги, довговічність зразків має великий розкид. Судити про розкид експериментальних точок прийнято по ширині діапазону на напіввисоті розподілу досвідчених даних. Стосовно випробувань за постійної напруги, будуються криві розподілу довговічності в

логарифмічних координатах. Випробування ідеальних об'єктів, таких як плівки або нитки, дає ширину кривих розподілу довговічності на напіввисоті приблизно один порядок. Для середовищ з більшою дисперсією міцності властивостей, якими є ДК, в координатах «довговічність – напруга» відбувається більш значний розкид експериментальних даних, що перевищує два і більше порядку за довговічністю. Діапазон довговічність (від секунд до декількох діб) займає шість порядків. Майже такий же діапазон швидкостей навантаження мають стандартні розривні машини. При проведенні випробувань за постійної заданої швидкості навантаження розкид експериментальних значень визначається дисперсією міцності властивостей ДК. Для міцних порід розкид величин міцності, визначених на кожній фіксованій швидкості навантаження, становить приблизно 10 %, для порід середньої міцності – в районі 20 %. Таким чином, при однаковій кількості випробувань точність визначення параметрів середовища в другому випадку буде вищою.

Так як ДК є неоднорідним середовищем і мають, як правило, досить велику дисперсію міцності, випробувальне обладнання повинно мати широкий діапазон варіації швидкостей навантаження. Використовуваний випробувальний стенд має безступінчасту зміну швидкостей навантаження, що відрізняються на два порядки, тобто охоплює діапазон у чотири порядки по швидкості навантаження.

Результати досліджень і обговорення

Рівні експериментальних факторів і результати випробувань показані у табл. 2.

Таблиця 2. Рівні змінних факторів і результати випробувань

Матеріал	Номер групи	Змінні фактори		Результати експерименту		
		температура ($^{\circ}K$)	фактична швидкість навантаження (мм/хв)	MOR^a (МПа)	час до руйнування t_p , (с)	DML^b (мм)
MF PB	1	293	0,81	11,25±0,92 ^c	1200	16,2
	2	313	2,86	10,48±0,84	304	14,5
	3	333	14,5	9,86±0,75	59	14,3
	4	353	98,25	9,75±0,64	8	13,1

^a MOR – межа міцності.

^b DML – переміщення при руйнуванні (*displacement under maximum level*).

^c Довірчий інтервал вказаний для $p = 0,05$ рівні.

Для вивчення впливу температури і швидкості деформації на MOR і часу до руйнування на рівні значущості $p = 0,05$ було проведено дисперсійний аналіз ($ANOVA$).

Результати $ANOVA$ і множинний порівняльний статистичний аналіз впливу температури і швидкості деформації показані в табл. 3.

Таблиця 3. Двофакторний дисперсійний аналіз без повторень

Залежна змінна	Джерело варіації	SS^a	df^b	MS^c	F ratio	P -Значення	F критичне значення
Межа міцності (MOR)	температура	9,92	3	3,306	187,6	1,9E-08	3,862
	швидкість деформації	0,43	3	0,146	8,297	0,0058	3,862
	похибка	0,15	9	0,017			
	разом	10,51	15				
Час до руйнування t_p	температура	1717515	3	572505	13,496	0,001	3,863
	швидкість деформації	1723625	3	574541	13,544	0,001	3,863
	похибка	381782	9	42420			
	разом	3822923	15				

^a SS – (sum of squares).

^b df – кількість ступенів свободи (degree of freedom).

^c MS – середньоквадратичне відхилення (mean square).

Рівень значущості для MOR і часу розриву t_p у досліджуваному діапазоні температур – від 273 до 353 °K, а для швидкості навантаження – від 0,81 до 98,25 мм/хв був менше 0,05, що вказує на те, що вплив різних температур на MOR і часу до руйнування t_p для цих змінних факторів є статистично значущими. Результати $ANOVA$ показали, що температура зробила більш істотний вплив, ніж швидкість деформування, на межу міцності $MF PB$ ($F_{ratio T} = 187,6 > F_{ratio tp} = 8,297$). У той же час, їх вплив на час до руйнування практично однаковий ($F_{ratio T} = 13,496 \approx F_{ratio tp} = 13,544$).

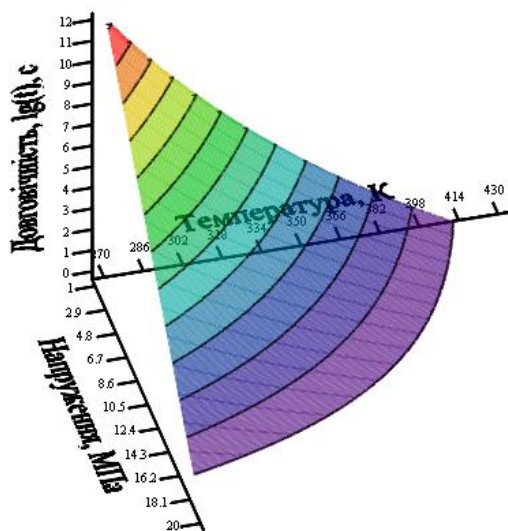
Раніше повідомлялося про монотонний, лінійний і спадний взаємозв'язки між міцністю на вигин і температурою від 20 °C до 140 °C з часом впливу 180 хвилин (Bekhta et al., 2003). У цьому ж дослідженні як міцність на вигин (MOR), так і час до руйнування показали істотно нелінійний характер їх залежності від температури і швидкості деформування. Отримані дані ще раз підтвердили правильність запропонованої раніше феноменологічної моделі міцності і жорсткості композиційних матеріалів на основі деревини. На підставі даних, отриманих в експериментах, були розраховані параметри термоактивації (ТАП) для кожного типу ДСП з використанням системи рівнянь (4). Результати розрахунків, раніше

отримані ТАПи на основі довготривалих випробувань, а також варіанти прискорених випробувань представлені в табл. 4.

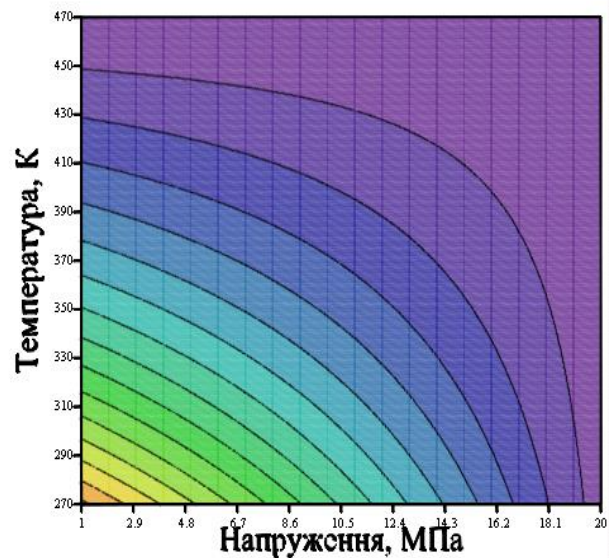
Значення параметрів термоактивації, отримані в результаті експериментів, дозволяють не тільки оцінювати тривалі згинні властивості ДК у діапазоні досліджуваних зовнішніх факторів (навантаження, температура), але і прогнозувати поведінку в широкому діапазоні їх варіацій. Оскільки, як випливає з результатів експериментів (табл. 2), властивості ДК змінюються з часом відповідно до рівняння (2), то цей зв'язок найбільш чітко можна зобразити, побудувавши поверхню другого порядку, що відповідає цьому рівнянню. Обчислювальний експеримент в середовищі *MathCAD* показав, що рівняння (2) описує поверхню другого порядку, гіперболічний параболоїд, графічне зображення якого представлено на рис. 1а. Це є зображення математичної моделі процесу втрати міцності за тривалого вигину. Вона оцінює ізгібні властивості ДК у залежності від умов їх експлуатації. Особливістю цієї поверхні є те, що у фазовому просторі змінних факторів σ , T є спеціальна фіксована сідлова точка – полюс. Характерною особливістю цієї точки є те, що вона залежить тільки від параметрів термоактивації.

Таблиця 4. Результати розрахунку параметрів термоактивації по визначальним рівнянням (3), *Shot-Time Test 2*

Матеріал	Метод	U_0 (кДж/моль)	$lg(\tau m)$ (с)	γ (кДж/моль•МПа)	T_m (К)
MF PB	<i>Long-Time Test</i> ^a	196	-0,7	9,10	486
	<i>Shot-Time Test 1</i> ^b	205	-1,9	8,90	490
	<i>Shot-Time Test 2</i>	194	-2,8	9,5	466

^a Kulman *et al.*, 2019^b Kulman *et al.*, 2017.

a)



b)

Рис. 1. Графічне представлення рівняння (3) у вигляді поверхні другого порядку гіперболічного параболоїда: а) – гранична поверхня довготривалої міцності на вигин ламінованого ДСП за вологості 10 %; б) – контурні графіки міцності на вигин за щільності ламінованої стружкової плити (MF PB) 750 кг/м³

На рис. 1б показані лінії рівня (контурний графік) для низки змінних σ , T .

Графік поверхні відгуку (рис. 1а) вказує на значну нелінійність процесу втрати міцності в часі (з погіршенням якості матеріалу). Це підтверджує нашу гіпотезу щодо нелінійної реакції ДК на зовнішні термо-волого-силові дії. Причиною нелінійності, як нам здається, є результат взаємодії змінних факторів між собою. Однак, це вимагає спеціального подальшого вивчення.

Висновки

Створена методика дозволяє значно скоротити час, необхідний для тестування. Метод дозволяє знаходити параметри термоактивації матеріалу за одночасної зміни термо-волого-силових навантажень, тобто відразу двох змінних факторів. Таким чином, стає можливим оцінити тривалість збереження міцних властивостей нових матеріалів і прогнозувати довговічність за експлуатації вже створених конструкцій.

References

- American Society for Testing and Materials (2006). 2006a D 1037. Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. West Conshohocken, PA, USA.
- Bekhta, P. & Niemz, P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*, 57 (5), 539–546. doi: <https://doi.org/10.1515/HF.2003.080>.
- Bekhta, P., Lecka, J. & Morze, Z. (2003). Short-term effect of the temperature on the bending strength of wood-based panels. *Holz Roh Werkst.* 61, 423–424. doi: <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0423-4>.
- Dinwoodie, J. M. (1981). Characterizing the performance of chipboard in the United Kingdom. *Proceedings of the WSU Symposium on Particleboard*, 15, 59–78.
- Hann, R. A., Black, J. M. & Blomquist, R. F. (1962). How durable is particleboard? *Forest Prod. J.*, 12, 577–584.
- Ito, K., Yajima, H. & Arai, M. (2018, 1–5 July). Creep Life Prediction Method by Using High-Temperature Indentation Creep Test. *The Eighteenth 18th International Conference of Experimental Mechanics* : proceedings (p. 450). Brussels. doi:10.3390/ICEM18-05319.
- Kulman, S., Boiko, L., Hurova, D. & Sedliačik, J. (2019). The effect of temperature and moisture changes on modulus of elasticity and modulus of rupture of particleboard. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*, 61 (1), 43–52. doi: <https://doi.org/10.17423/afx.2019.61.1.04>.
- Kulman, S., Boiko, L., Pinchevska, O. & Sedliačik, J. (2017). Durability of wood-based panels predicted using bending strength results from accelerated treatments. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*, 59 (2), 41–52. doi: <https://doi.org/10.17423/afx.2017.59.2.04>
- Leicesterr, H. (1971). A rheological model for mechanosorptive deflections of beams. *Wood Science and Technology*, 5 (3), 211–220.
- Liu, D., Li, H. & Liu, Y. (2015). Numerical Simulation of Creep Damage and Life Prediction of Superalloy Turbine Blade. *Mathematical Problems in Engineering*, 1, 1–10. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/732502>.
- May, I. & Cunha, F. (1999). Creep damage assessment and remaining life evaluation. *International Journal of Fracture*, 97 (1), 125–135. doi: 10.1023/A:1018396017834.
- Okkonen, E. A. & River, B. H. (1996). Outdoor aging of wood-based panels and correlation with laboratory aging, Part 2. *Forest Prod. J.*, 46 (3), 68–74.
- Pizhurin, A. A. (2004). Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke [Bases of Scientific Researches in the Woodworking]. Moskva : MGUL [in Russian].
- Rabindra, N. G. (2013). Creep Life Predictions of Engineering Components. *Problems & Prospects Procedia engineering*, 55, 599–606. doi: 10.1016/j.proeng.2013.03.301
- Ranta-Maunuas, A. (1975). The viscoelasticity of wood at varying moisture content. *Wood Science and Technology*, 9, 189–205.
- Ratner, S. B. & Yartsev, B. P. (1992). Fizicheskaya mekhanika plastmass. Kak prognoziryut rabotosposobnost? [Physical mechanics of plastics. How to predict the performance?]. Moskva : Khimiya [in Russian].
- Regel, V. P., Slutsker, A. I., & Tomashevskiy, E. E. (1974). Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel [Kinetic nature strength of solids]. Moskva : Nauka [in Russian].
- River B. H. (1994). Outdoor aging of wood-based panels and correlation with laboratory aging. *Forest Prod. J* 44 (11/12), pp. 55-65.
- Yu, Q. & Zhou, H. (2016). Study on creep damage and life prediction of threaded connections at high temperature. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(1) 1–9. doi: 10.1177/1687814016629347.
- Zhurkov, S. N. (1965). Kineticheskaya kontseptsiya prochnosti tverdykh tel [Kinetic concept of the strength of solids]. *Mezhdunarodnyy zhurnal mekhaniki razrusheniya*. 1 (4), 311–322 [in Russian].