

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет лісового господарства та екології
Кафедра лісового та садово-паркового господарства
Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ГОРБАТЮК РУСЛАН ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 684.4.04

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

СИНЕРГЕТИКА ФЕНОМЕНУ РЕОЛОГІЧНОГО ВИБУХУ У ДЕРЕВИНІ ТА
КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ НА ЇЇ ОСНОВІ

205 «Лісове господарство»

Подається на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
кваліфікаційна робота містить результати власних наукових досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

_____ Горбатюк Р.В.

Керівник роботи
Кульман Сергій Миколайович
кандидат техн. наук, доцент

Житомир – 2024

Висновок кафедри лісового та садово-паркового господарства

за результатами попереднього захисту: _____

Протокол засідання кафедри лісового та садово-паркового господарства

№ __ 8 __ від «_ 03 __» _____ 12 _____ 2024 р.

Завідувач кафедри лісового та садово-паркового господарства

к.с.-г. н., доцент _____ Сірук Юрій Вікторович

«_ 03 __» _____ 12 _____ 2024 р.

Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувач вищої освіти Горбатюк Руслан Володимирович захистив кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою _____

за шкалою ECTS _____

за національною шкалою _____

Секретар ЕК

АНОТАЦІЯ

Горбатюк Р.В. Синергетика феномену реологічного вибуху у деревині та композиційних матеріалах на її основі.– Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 205 – лісове господарство. – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

У цьому дослідженні представлені результати моделювання особливостей реологічної поведінки деревини та деревних композитів при стисканні.

Отримані результати дозволяють говорити про адекватність запропонованої математичної моделі, що дозволяє оптимізувати керуючі параметри при механічній обробке деревини.

Ключові слова: реологія, стискання деревини, реологічний вибух

ANNOTATION

Gorbatjuk R.V. Features of the rheological explosion of wood and wood composites during compression.– Qualification work on manuscript rights.

Qualifying work for a master's degree in the specialty 205 – forestry. – Polissya National University, Zhytomyr, 2024.

This study presents the results of modeling the features of the rheological behavior of wood and wood composites under compression.

The obtained results allow us to speak about the adequacy of the proposed mathematical model, which allows optimizing the control parameters during the mechanical processing of wood.

Key words: rheology, wood compression, rheological explosion,

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	5
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ	8
РОЗДІЛ 3. НАТУРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ	16
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	28
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	29

ВСТУП

Реологічний вибух – це явище, що виникає при швидкій зміні стану матеріалу, що може призвести до руйнування структури та утворення нових форм. У контексті деревини та деревних композитів це явище стає особливо важливим для розуміння їхньої поведінки при механічному впливі, теплових змінах або змінах вологості.

Реологічний вибух відбувається, коли внутрішні напруження в матеріалі перевищують його характеристики міцності, що призводить до раптового руйнування. У деревині може бути викликано як фізичними, і хімічними процесами. Деревина, будучи гігроскопічним матеріалом, реагує на зміни вологості, що може посилити виникнення реологічного вибуху.

Синергетика як наука про самоорганізацію дозволяє розглядати взаємодію різних факторів, що впливають на поведінку деревини. Поєднання температури, вологості та механічної напруги може створювати умови, за яких найімовірніше відбудеться реологічний вибух. Моделювання цих взаємодій може допомогти у прогнозуванні стійкості деревних матеріалів за різних умов експлуатації.

Вплив вологості. Підвищення вологості призводить до збільшення рухливості води в клітинних стінках деревини, що знижує її характеристики міцності. За певних умов це може спричинити реологічний вибух.

Температурні зміни. Температура також грає критичну роль. За високих температур деревина втрачає свої механічні властивості, що збільшує ймовірність руйнування.

Механічні навантаження. Синергія між механічними навантаженнями та станом матеріалу (вологість та температура) визначає, як деревина реагує на зовнішні дії.

Розуміння реологічного вибуху у деревині та деревних композитах має важливе значення для різних галузей. Наприклад, у виробництві деревних плит та композитів, знання про синергетичні взаємодії може допомогти розробити

більш стійкі матеріали, здатні витримувати механічні навантаження та зміни зовнішнього середовища.

У будівництві, де деревина часто використовується як основний будівельний матеріал, знання про потенційні ризики реологічного вибуху допоможе у виборі відповідних видів деревини та композитів, а також у розробці технологій їх обробки та захисту.

Поглиблене розуміння взаємодії факторів, що впливають на стійкість деревних матеріалів, може суттєво підвищити якість та безпеку продукції в деревообробній та будівельній галузях. Інтеграція наукових знань та практичних підходів дозволить створити більш ефективні та стійкі матеріали, здатні задовольняти сучасні вимоги.

Мета дослідження - синергетика феномену реологічного вибуху у деревині та композиційних матеріалах на її основі

Під час проведення досліджень використовувалися такі методики: обчислювальний експеримент у середовищі МАТКАД,

Об'єкт досліджень – фізико - механічні властивості деревини.

Предмет досліджень – особливості реологічної поведінки деревини під час стиснення.

Методика дослідження базується на результатах досліджень повзучості деревини, які показують суттєву залежність характеристик повзучості при різних видах застосування навантаження та різних рівнях навантаження. Таким чином, експериментальні дані щодо кривих характеристик повзучості деревини вказують на необхідність урахування нелінійної повзучості, а також впливу діаграми миттєвого деформування в рівняннях повзучості.

Практична значимість одержаних результатів. Результати досліджень дозволяють краще зрозуміти особливості роботи деревини та деревних композитів під час критичних навантажень.

Публікації.

1. Кульман С.М., кандидат технічних наук, Горбатюк Р.В. Феномен реологічного вибуху у деревині і деревних композитах, Ліс, наука, молодь: матеріали XII Всеукр. наук.-практ. конф. (26 листопада 2024 р.). – Житомир: Поліський національний університет, 2024. – 193 с.

2. Мосейчук В.В., магістрант, Ілащук П.Ю., магістрант, Горбатюк Р.В., магістрант, Кульман С.М., кандидат технічних наук, дослідження кінетики сушіння та гідратації термомодифікованої деревини сосни. II Міжнародної науково-практичної конференції «актуальні проблеми дослідження лісових та урбоекосистем України в умовах воєнного стану» (20 листопада 2024 року): Київ – 2024.– 221 с.

3. Ілащук П.Ю., студент, Мосейчук В.В., студент, Горбатюк Р.В., студент Дслідження теплообміну при просоченні та сушінні деревини. Ліс, наука, молодь: матеріали XII Всеукр. наук.-практ. конф. (26 листопада 2024 р.). – Житомир: Поліський національний університет, 2024. – 193 с.

Структура та обсяг роботи. Робота містить 29 сторінок основного тексту, 28 рисунків, 47 найменувань літератури та додатки.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Починаючи з Галілея, експерименти, виконані з використанням деревини, вносили суттєво нові знання про міцність твердих тіл. Деревина, як конструкційний, так і природний матеріал зі складною внутрішньою структурою, є привабливим поєднанням для перевірки практичних і теоретичних положень теорії міцності. У ході експериментального дослідження було проведено випробування макрозразків, взятих у трьох напрямках анізотропії, за «жорсткого» режиму навантаження. Отримано принципово нові, раніше невідомі види опору деревини навантаженням. Особливості реологічної поведінки деревини при впливі зовнішніх навантажень пов'язані насамперед з її суворою ієрархічною структурою (рис. 1).

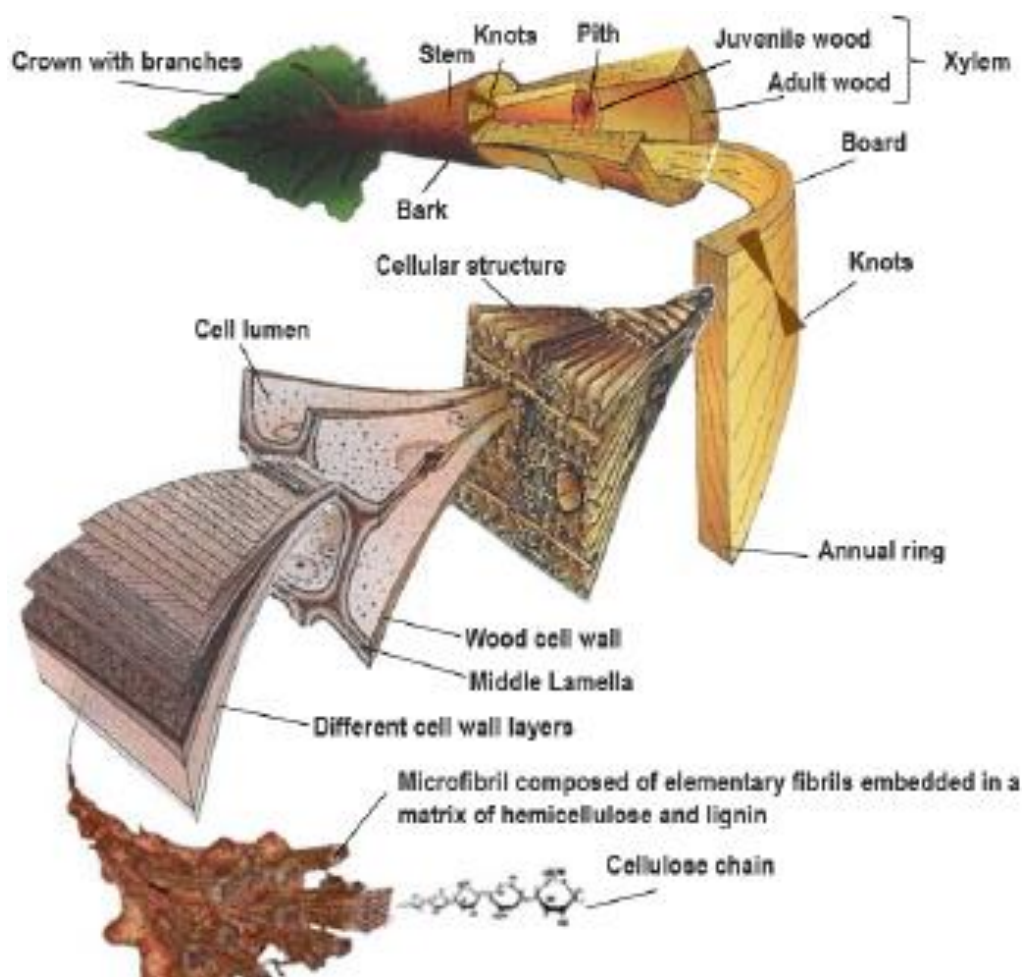


Рис. 1. Деревина як біоматеріал з ієрархічною структурою

A. I. Aleksandrov, V. G. Shevchenko, A. N. Ozerina Rheological explosion in polyethylene with different chain lengths. High-molecular compounds. Series A, 2021, Vol. 63, No. 1, pp. 36–40. Досліджено виникнення реологічного вибуху у таблетках поліетилену. Момент незворотного руйнування зразка та значення порога реологічного вибуху лінійно зменшуються із збільшенням довжини полімерного ланцюга. Внаслідок вибуху теплота плавлення полімерів з ММ, що дорівнює 3×10^5 та 1×10^6 , зменшується, а для ПЕ з $M = 3.5 \times 10^4$ теплота плавлення практично не змінюється.

Зареєстровано імпульси електричного струму. Їхні фур'є-образи мають вигляд смугастих спектрів, які описуються моделями Лоренца для гармонійного осцилятора з загасанням і моделі Гавріліака-Негамі для діелектричної релаксації. Експериментальні дані дозволяють припустити, що реологічний вибух пов'язаний із накопиченням пружної енергії в аморфній фазі ПЕ, а при реологічному вибуху відбувається розрив полімерних ланцюгів з утворенням радикалів RO_2 .

Дослідження поведінки різних речовин в умовах високого тиску та деформацій зсуву розпочалися у тридцятих роках ХХ століття, і продовжуються дотепер [1–15]. Р.В. Bridgman першим [1, 2] виявив, що при цьому відбувається викид речовини із зони високого тиску з відкритими межами, що супроводжується інтенсивними звуковими ефектами та диспергуванням матеріалу, що стискається.

Р.В. Bridgman назвав це явище *механічним вибухом*, а пізніше за ним міцно закріпилася назва *реологічного вибуху* [3–15]. Інтерес до цього явища не слабшає, оскільки воно безпосередньо пов'язане з питаннями про перехід матеріалу, що руйнується, з тендітного стану в пластичний при динамічному непружному стисканні [3, 4]; із стійкістю керамік, стекол, металевих сплавів до миттєвого руйнування [5, 6]. У роботах [7–9] повідомлялося, що при стисканні пластин деяких неорганічних речовин або полімерів у ковадлах Бріджмена при тиску 5–15 кбар виникає стрибкоподібний викид матеріалу, що

супроводжується сильним акустичним випромінюванням. У роботі [10] на прикладі склоподібних поліепоксидів було показано, що тиск, у якому відбувається реологічний вибух PRV, залежить від структури полімеру.

Нещодавно для полімерних композитів мультифероїків виявили новий ефект: встановлено, що реологічний вибух супроводжується радіочастотним надвипромінюванням [13–16]. Питання про те, що відбувається при реологічному вибуху з полімерною матрицею композиційного матеріалу, практично не приділялося уваги [8-15], хоча очевидно, що зміна її структури і фізико-хімічні процеси, що при цьому протікають, мають значний вплив на перенесення зарядової щільності і формування радіочастотного імпульсу. Мета цієї роботи з'ясувати, як структура лінійних полімерів та його реологічні властивості впливають виникнення і параметри реологічного вибуху.

Експериментальні дані дозволяють припустити, що реологічний вибух пов'язаний з накопиченням пружної енергії в аморфній фазі ПЕ, а при реологічному вибуху здійснюється розрив полімерних ланцюгів з утворенням радикалів RO₂. Можна припустити, що при цьому відбувається інтенсивне утворення і накопичення різного роду дефектів, їх злиття, що призводить до утворення мікротріщин, стінки яких з'єднані між собою.

Зазначимо, що для деревини та деревних композитів досліджень феномену реологічного вибуху у доступній технічній літературі виявлено не було.

Стиснення – найбільш вивчений вид напруженого стану, один із найпростіших за реалізацією експерименту та за практичною важливістю вид випробувань. Випробування на стиск звільнені від різних гіпотез, не обмежені можливостями обладнання та формою зразків, можуть проводитися на зразках різної форми, і тому дуже зручні у практичному застосуванні.

Міцність деревини при стиску визначається вздовж і поперек волокон, в останньому випадку - в радіальному і тангентальному напрямках. Кожен із напрямків при стисканні має свої особливості, які не можна обминати

стороною. Так, наприклад, при стиску поперек волокон необхідно враховувати площу зразка, на яку діє навантаження.

Можливі два випадки: навантаження прикладене на всю поверхню зразка, та на частину поверхні. У другому випадку у зразку високі деформації можуть бути спричинені зминанням.

Деформацію деревини всіх порід при стисканні упоперек волокон у радіальному, а розсіянопорових листяних порід та у тангентальному [123] описує у три стадії: у першій фазі деформація протікає до межі пластичного перебігу ранньої деревини. За термінологією [40] Перша фаза відповідає "області неповної пружності" ранньої деревини. Перша фаза для деревини різної вологості закінчується при відносній деформації 3-6%. Криві пружної та пластичної деформації мають вигляд параболи, зверненої опуклістю вгору.

- У другій фазі всі криві мають горизонтальну або зі слабким підйомом ділянку. Величина пологої частини як для пружної, так і для пластичної деформації сильно залежить від вологості деревини в момент стиснення.

- У третій фазі криві знову спрямовані вгору, зі збільшенням навантаження зростають деформації, переважно незворотні.

Деформація у першій фазі протікає за рахунок стиснення ранньої деревини річних шарів. Фаза продовжується до межі пластичного перебігу оболонок клітин ранньої деревини. Друга фаза починається з пластичного перебігу ранньої деревини, із втратою стійкості клітин. Деформація відбувається в основному через зминання клітин ранньої деревини. У міру залучення до деформації клітин пізньої деревини річних шарів друга фаза деформації плавно переходить у третю. Величина повної деформації у другій фазі може бути визначена за процентним змістом ранньої деревини, розуміючи при цьому відношення ширини ранньої частини річних шарів до їхньої загальної ширини.

Третя фаза протікає, переважно, з допомогою стискування клітин пізньої деревини. Через міцність стінок клітини змінюються при відносно великій напругі.

При всіх ступенях стиснення деревини, що мають кімнатну температуру, відношення пружної та пластичної деформації до повної, є величини досить стійкі для певної вологості. При стиску поперек волокон сухої деревини всіх порід у радіальному, а деяких листяних порід і в тангенталіум напрямку загальна деформація може сягати 75%. Величина деформації "назад" пропорційна об'ємній вазі деревини: чим більша вага, тим менше деформації. При величині відносної деформації, близької до 50%, спостерігається бічне витріщення, що супроводжується мікроруйнуванням деревини.

Стиснення вздовж волокон суттєво відрізняється від поперечного стиску за багатьма показниками. На відміну від пресування деревини при поперечному стиску руйнування вздовж волокон відбувається по лініях ковзання, що розвиваються під різними кутами залежно від породи деревини та її густини. Чим щільніша деревина, тим менше кут нахилу. З вертикальною лінією кут руйнування становить у дуба 57° , у сосни $59,5^\circ$, у ялиці $84,5^\circ$.

Слід зазначити, що спостереження ліній ковзання було важкоздійсненним завданням. При покроковому навантаженні зразка в ньому розвиваються деформації аж до критичного навантаження (визначається в серії випробувань), при досягненні якої наступне збільшення сили призводить до лавиноподібного руйнування. Причому заздалегідь невідомо із задовільною точністю це критичне значення.

Доводилося з появою перших ознак руйнування миттєво розвантажувати зразок. Якщо час на початок розвантаження перевищувало 0,5 секунди, то зразок відразу руйнувався, і спостерігати лінії ковзання було неможливо [36, 37].

Візуально, навіть при успішному розвантаженні, вид ліній ковзання, що виходять, давав мало приводів для успішних висновків про властивості матеріалу, тому застосовувалися різні додаткові прилади і методи.

При вивченні під мікроскопом явища руйнування деревини сосни при стисканні вздовж волокон виявлено, що наявні на стінках трахеїд дрібні, ледь уловлені в поляризованому світлі, лінії ковзання розвиваються у великі, кути, що складають з віссю трахеїд, близько 70° . Надалі лінії з'єднуються в лінії руйнування, при цьому кожне волокно поводить себе як стрижень при поздовжньому вигині.

Кути нахилу ліній ковзання в ранній деревині значно більші, ніж у пізній. Для сосни кути становлять відповідно $29,2^\circ$ та $17,3^\circ$. Для модрина, 27° і $15,8^\circ$.

Другий вид виявлення ліній ковзання, за [33] на початкових стадіях руйнування, полягає у розгляді в мікроскоп забарвлену хлор-цинк-йодом деревину. У місцях руйнування целюлоза стикається з розчином, у результаті відбувається синьо-фіолетове фарбування.

Узагальнюючи великі вищевикладені дані можна дійти невтішного висновку, робота деревини при стиску досліджена досить повно до критичних навантажень вздовж, поперек і під різними кутами до волокнам. Однак є і наявність «білих» плям.

Переважає більшість експериментальних даних отримані для малих зразків з "чистої" деревини, в якій вплив різних особливостей внутрішньої будови деревини може бути досить великим.

Немає даних про роботу деревини при пограничних навантаженнях (на третій ділянці діаграми «Р-ε»). Не досліджено ефекту зміцнення деревини при стисканні поперек волокон після зминання клітин та значного зменшення розмірів зразка.

Лише в одного автора вдалося знайти досліді щодо визначення стійкості дерев'яних стрижнів, в яких також нічого не йдеться про вплив геометричних параметрів стрижнів на втрату стійкості. У реальних умовах є дуже складним

провести вичерпні експерименти по всьому спектру проблем роботи деревини на стиск через різноманіття комбінацій кутів, розрізів (радіальний, тангенціальний) і різних розмірів перерізів.

При проведенні експерименту на стиснення деревини необхідно враховувати так звані «контактні» деформації у місці взаємодії зразка з джерелом навантаження. Так як опір зім'яттю у деревини більш ніж у десять разів менше опору стиску, залишкові «контактні» деформації можуть бути зіставні за величиною з деформаціями всього зразка, що стискається.

За Івановим Ю.М. контактні деформації присутні у всьому діапазоні напруг [42]. Їх розвиток можна поділити на три етапи. На першому етапі відбувається ущільнення дотичних з обладнанням шарів зразка. На другому ділянці ущільнення закінчується, і контактне деформації пропорційні загальним. Абсолютна величина цього відношення змінюватиметься в залежності від висоти зразка та якості обробки торцевих частин. Немає точних даних про вплив поперечного перерізу на відношення деформацій¹⁵. На третій ділянці знову можна спостерігати збільшення контактних деформацій, що можна пояснити меншою межею міцності деревини на зминання, що починається раніше, ніж незворотні деформації стиснення.

Таким чином, проведення випробувань деревини на стиск, крім складнощів, пов'язаних з різною орієнтацією навантаження та площин симетрії деревини, утрудняється також наявністю деформацій зминання в місцях контакту зразка з обладнанням. Схема зміни деформацій деревини у часі при стабільній температурі та вологості показана на рис. 2.

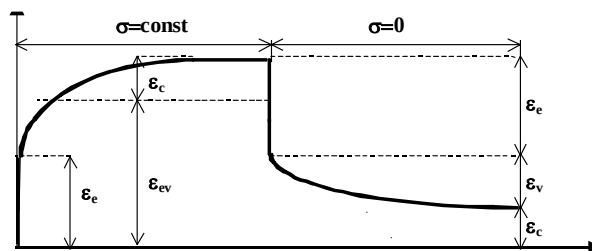


Рис. 2. Зміна деформацій деревини у часі при стабільній температурі та вологості

ε_e - пружна деформація, внаслідок оборотної зміни середніх міжчасткових відстаней;

ε_V - високоеластична деформація, пов'язана з оборотним перегрупуванням частинок (ланок ланцюгових молекул); при цьому об'єм тіла не змінюється;

ε_C - в'язко-плинна, деформація повзучості, обумовлена незворотним зміщенням молекулярних ланцюгів; об'єм тіла при цьому не змінюється.

Полімери можуть перебувати в трьох фізичних станах – склоподібному, високоеластичному та в'язко-текучому. Кожна з них характеризується переважним типом деформацій. Для першого стану характерні оборотні пружні деформації, для другого – також оборотні високоеластичні, для третього – незворотні в'язко-текучі.

Перехід полімерів з одного стану до іншого зазвичай відбувається при зміні температури, критичні значення якої називаються температурою склування і температурою плинності. Здатність до збільшення деформації досягається не лише підвищенням температури, а й запровадженням пластифікатора.

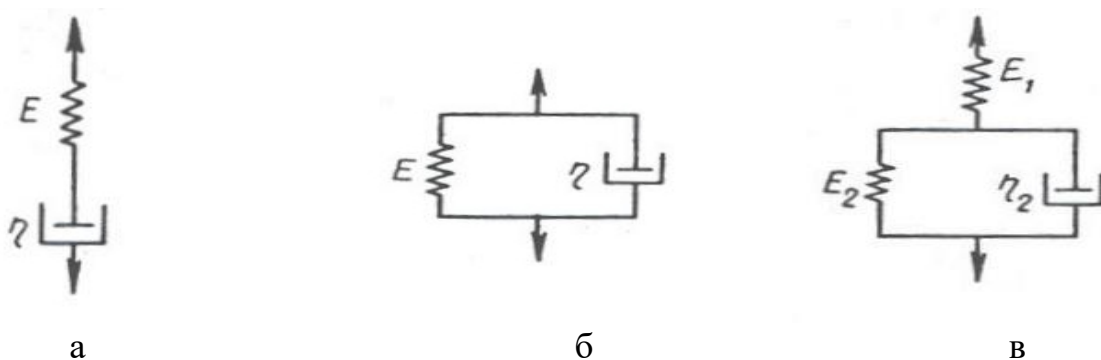


Рис. 3. а – Максвеллове тіло, б – модель Кельвіна, в – модель стандартного лінійного в'язко-пружного тіла.

Реологічні моделі враховують наявність широкого набору часів релаксації. Модель стандартного лінійного в'язко-пружного тіла представлена на рис. 4.

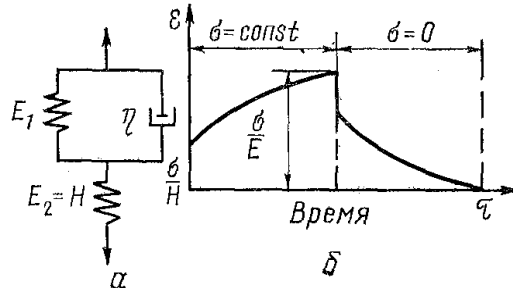


Рис. 4. Модель стандартного лінійного в'язко-пружного тіла

где $n = \frac{\eta_2}{E_1 + E_2}$ – время релаксации,

$H = E_2$ – мгновенный модуль упругости,

$E = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$ – длительный модуль упругости.

Реологічні моделі, що враховують наявність широкого набору часів релаксації, показані на рис. 5.

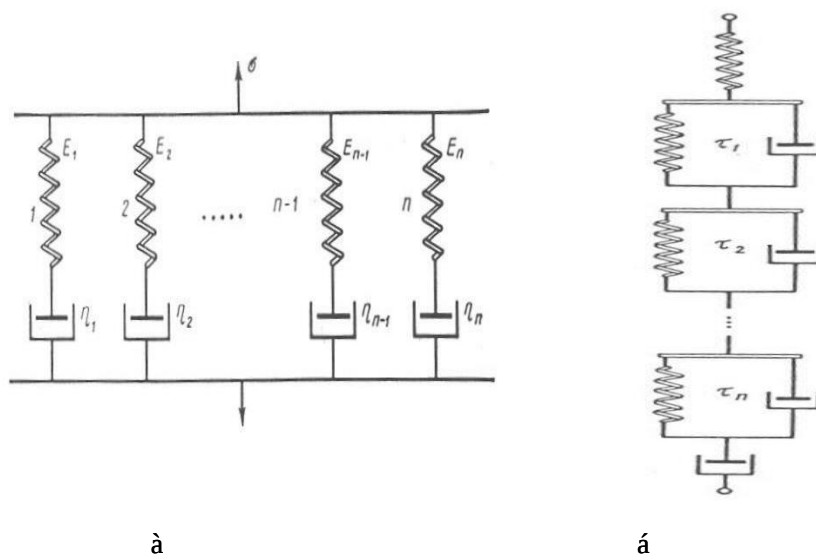


Рис. 5. а – модель Куна, б – модель Алфрея

Міцність деревини при стисканні упоперек волокон показана на рис. 6.

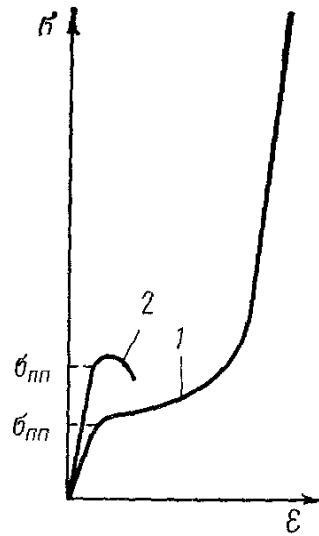


Рис. 6. Діаграми стиснення деревини поперек волокон

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Модель створена для опису явища реологічного вибуху за допомогою базових кінетичних рівнянь деформування-руйнування твердих тіл.

Синергетична, тобто спільна взаємодія таких структурних елементів і призводить до виникнення феномену реологічного вибуху у деревині та деревних композитах.

Базовий спосіб таких змін описаний у патенті на винахід під назвою «Спосіб прогнозування тривалої міцності матеріалів за повзучості», Патент України № 120865 від 25.02.2020 , рис. 7.



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **120865** (13) **C2**
 (51) МПК (2020.01)
 G01N 3/00

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ
 ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА
 СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: а 2017 06196 (22) Дата подання заявки: 19.06.2017 (24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 25.02.2020 (41) Публікація відомостей про заявку: 10.04.2018, Бюл.№ 7 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.02.2020, Бюл.№ 4	(72) Винахідник(и): Кульман Сергій Миколайович (UA) (73) Власник(и): Кульман Сергій Миколайович, вул. Львівська, 11, кв. 23, м. Житомир, 10030 (UA) (56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 32880 A, 15.02.2001 SU 1879257 A1, 23.09.1991 UA 66481 A, 17.05.2004 UA 54970 A, 17.03.2003 UA 100484 U, 27.07.2015 UA а201607142, 10.02.2017 UA 55848 U, 27.12.2010 CN 105628511 A, 01.06.2016 RU 2059242 C1, 27.04.1996 Кульман С. М. Нелінійні ефекти деформування і руйнування композиційних матеріалів на основі деревини / С.М. Кульман // Науковий вісник НУБіП України. – 2011. - Випуск 164 (3).
--	---

(54) СПОСІБ ПРОГНОЗУВАННЯ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ЗА ПОВЗУЧОСТІ

(57) Реферат:

Винахід належить до способів аналізу властивостей матеріалів із визначенням фізичних характеристик зразків матеріалу. У способі зразок піддають деформації до руйнування, будують базову діаграму деформування за повзучості деталі, що знаходиться під постійним навантаженням, а для прогнозування довговічності будують контрольну діаграму деформування аналогічної деталі. Будують кінетичну модель процесу деформаційного руйнування тіла, в якій матеріал, що навантажується, є структурою, що складається з сукупності елементів, які знаходяться під постійним зовнішнім навантаженням. Спосіб включає визначення характерних параметрів пошкодження і прогнозування часу досягнення критичної позначки міри пошкодження. Як запобіжний порівняний ступінь пошкодження приймається скалярна величина Ψ , що дорівнює відношенню поточної концентрації зруйнованих елементів структури до поточної концентрації незруйнованих елементів структури. При цьому ресурс вважається вичерпаним при значенні міри пошкодження, що перевищує Ψ_f . Використання винаходу дозволяє підвищити точність прогнозування тривалої міцності за повзучості.

Рис. 7. Патент України № 120865 від 25.02.2020

Спосіб прогнозування тривалої міцності матеріалів за повзучості, що полягає у визначенні характерних параметрів пошкодження і прогнозування часу досягнення критичного значення міри пошкодження, який відрізняється тим, що зразок піддають деформації до руйнування, будують базову діаграму деформування за повзучості деталі, що знаходиться під постійним навантаженням, а для прогнозування довговічності будують контрольну діаграму деформування аналогічної деталі, діаграми використовують для визначення параметрів t_1 , ε_1 , t_2 , ε_2 та наступного визначення параметрів k_1 та k_2 , будують кінетичну модель процесу деформаційного руйнування тіла, в якій матеріал, що навантажується, є структурою, що складається з сукупності елементів, які знаходяться під постійним зовнішнім навантаженням, а як запобіжний порівняний ступінь пошкодження приймається скалярна величина Ψ , що дорівнює відношенню поточної концентрації зруйнованих елементів структури до поточної концентрації незруйнованих елементів структури, причому ресурс вважається вичерпаним при значенні міри пошкодження, що перевищує Ψ_f :

$$\Psi = \frac{CQ(t)}{CA(t) + CB(t)} \geq \Psi_f = 1,$$

де Ψ_f - міра допустимої пошкоженості;

$$CA(t) = CA(0)e^{-k_1 t}$$

$$CB(t) = CA(0) \left(\frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_2 t} - \frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_1 t} \right),$$

$$CQ(t) = CA(0) \left(1 - \frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_2 t} + \frac{k_2}{k_1 - k_2} e^{-k_1 t} \right),$$

$CA(t) \in (1...0)$ - поточна концентрація незруйнованих елементів структури, які знаходяться у пружному стані у момент часу t ;

$CB(t) \in (0...1)$ - поточна концентрація незруйнованих елементів структури, які знаходяться у в'язкопружному стані у момент часу t ;

$CQ(t) \in (0...1)$ - поточна концентрація елементів структури, які знаходяться у зруйнованому стані у момент часу t ;

$k_1 = -\frac{1}{(t_2 - t_1)} \ln \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)$ - константа швидкості переходу елементів структури з пружного стану у

в'язкопружний, c^{-1} ;

t_1 - час закінчення ділянки пружного деформування та початку ділянки в'язкопружного деформування, с;

t_2 - час виміру деформації ε_2 на ділянці сталої повзучості;

ε_1 - деформація у момент часу t_1 ;

ε_2 - деформація у момент часу t_2 ;

$k_2 = \alpha^{-1} k_1$ - константа швидкості переходу елементів структури з в'язкопружного стану у зруйнований, c^{-1} ;

α - параметр, який характеризує реологічні властивості матеріалу, ступінь його непружності.

Рис. 8. Формула винаходу Патент України № 120865 від 25.02.2020

Попередній (пілотний) експеримент з метою підтвердження нашої гіпотези про те, що деревина має граничну щільність, був проведений з тими ж матеріалами. Проте пресування проводилося з допомогою програмно-апаратного комплексу з урахуванням розривної машини Р5-М2. Максимальне зусилля пресування становило близько 5 тн. Швидкість переміщення рухомої траверси була постійною та становила 2 мм/хв. На рис. 9 у графічному вигляді представлені результати навантаження у координатах «переміщення – зусилля пресування».

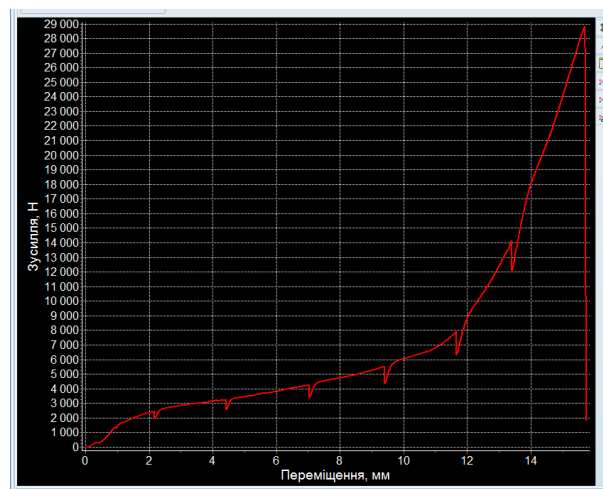


Рис. 9. Результати навантаження у координатах «переміщення – зусилля пресування».

Вигляд кривої повністю збігається з відомими результатами інших дослідників [35. 40]. До певного моменту часу, саме до часу, як у деревині залишиться порожнеч, зусилля пресування йде приблизно з постійної швидкістю. У цей час деревина поводить себе спочатку як пружне, а потім в'язко-пружне тіло. Якщо розглянути деревину як тіло, що складається з сукупності багатьох елементів структури, які мають різні пружні та в'язко-пружні властивості, а кількість таких елементів у певному обсязі визначає їх концентрацію, то можна припустити, що перехід цих елементів з пружного стану в в'язко-пружне, а потім у надпружне протікає в дві стадії, що одночасно протікають, швидкості яких залежать як від швидкості навантаження, так і від

інших зовнішніх (температура, вологість) і внутрішніх факторів (порода, щільність, пористість).

Це дозволяє побудувати кінетичну модель процесу пресування деревини. Приклад такої моделі представлений у вигляді кінетичної схеми на рис. 10.

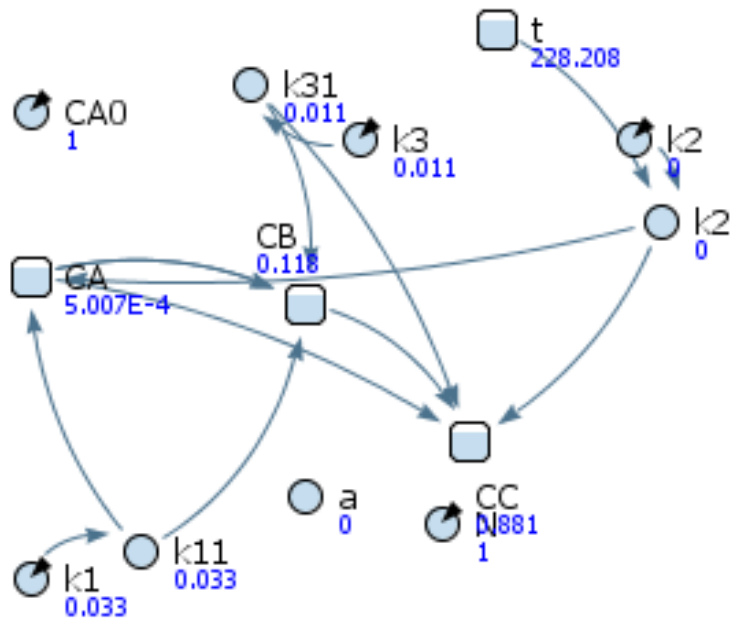


Рис. 10. Кінетична модель процесу пресування деревини.

Рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь, що описує кінетичну модель показано на рис. 8, на якому графіки виражають зміну в часі концентрації пружних структурних елементів, $CA(t)$, концентрацію в'язко-пружних елементів $CB(t)$, концентрацію надпружних елементів, $CC(t)$, а також значення параметра ψ , який характеризує здатність матеріалу чинити опір зовнішньому навантаженню :

$$\psi = 1/((A - CC(t))/(CA(t)+CB(t))) ,$$

де A – константа, яка залежить від умов навантаження, а також зовнішніх умов та внутрішніх характеристик матеріалу.

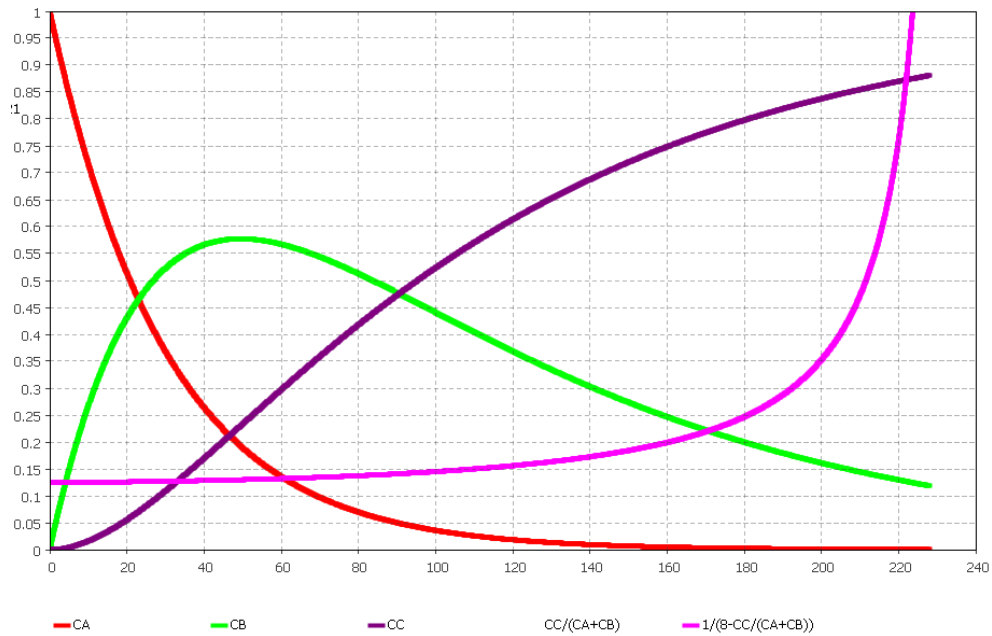


Рис. 11. Розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь, що описує кінетичну модель на рис. 10.

З графіка зміни параметра ψ випливає, що він якісно повторює форму кривої опору, показаному на рис. а також характер кривої 1 на рис. 11. Це дає підстави вважати, що наша математична модель у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь адекватно визначає характер процесів, що протікають у часі.

РОЗДІЛ 3. НАТУРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

3.1. Матеріали та методи

Як досліджувані матеріали використовувалися бруски деревини сосни розміром 95x80x20 мм, дуба 65x57x30 мм і 115x57x25, бука 108x80x21 мм, червоного дерева 126x84x18 мм, а також такі композити як фанера 50x50x20 мм, ДСП 50x50x17 мм, та ХДФ (ламінат) 50x50x8 мм.

Випробування проводились у лабораторії фізико-механічних досліджень деревини та деревних матеріалів кафедри лісового та садово-паркового господарства факультету лісового господарства та екології Поліського національного університету.

Температура у приміщенні 19 °С, вологість RH = 65%.

Випробування проводилися на спеціальному програмно-апаратному комплексі з урахуванням розривної машини P5-M2, рис. 12.

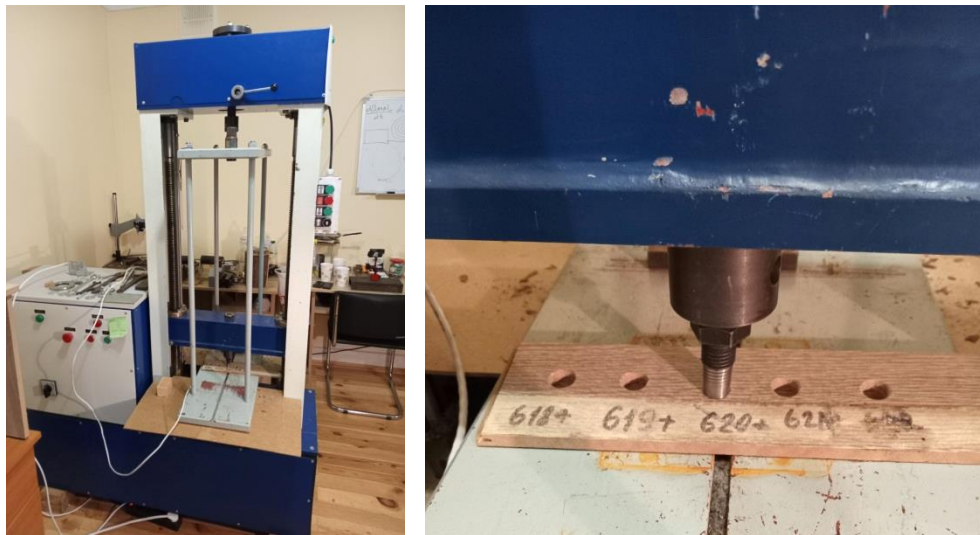


Рис. 12. Програмно-апаратний комплекс на базі розривної машини P5-M2 (ліворуч) та зона тиску (праворуч). Діаметр індентора 13,01 мм.

3.2. Результати та обговорення

Результати випробувань подано на рис. 13 - 28. На рис. 13 показані результати випробувань червоного дерева 126x84x18 мм, на яких видно характерні особливості зони руйнування. Завдяки особливостям будови деревини зона руйнування має куполоподібну форму, яка розширюється вздовж осі.



Рис. 13. Результати випробувань червоного дерева 126x84x18 мм, на яких видно характерні особливості зони руйнування.

На рис. 14 показано криву навантаження зони руйнування в координатах «Зусілля (Н) – переміщення (мм)». Характер кривої повністю відповідає кривою навантаження при пресуванні деревини поперек волокон, показаному на рис. 9, крива 1. Крім того, ця ж крива повторює криву навантаження в режимі з загостренням нашої математичної моделі, показаної на рис. 8.

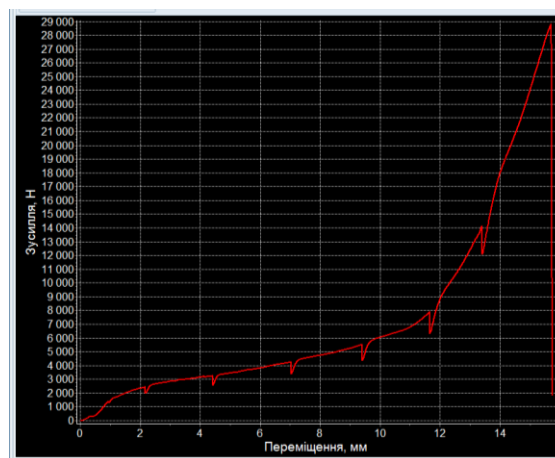


Рис. 14. Крива навантаження зони руйнування червоного дерева в координатах "Зусілля (Н) - Переміщення (мм)".



Рис. 15. Результати випробувань фанери 50x50x20 мм, на яких видно характерні особливості зони руйнування.



Рис. 16. Результати випробувань дуба 65x57x30 мм, на яких видно характерні особливості зони руйнування.



Рис. 17. Результати випробувань дуба 65x57x30 мм, на яких видно характерні особливості зони руйнування.



Рис. 18. Результати випробувань дуба 115х57х25 мм, на яких видно характерні особливості зони руйнування.

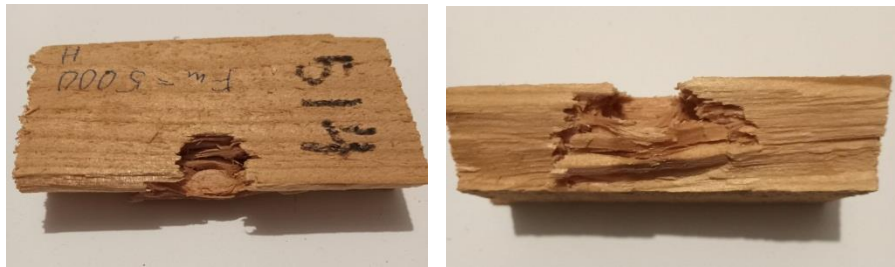


Рис. 19. Результати випробувань сосни 95х80х20 мм, на яких видно характерні особливості зони руйнування.



Рис. 20. Результати випробувань бука 108х80х21 мм, на яких видно характерні особливості зони руйнування.



Рис. 21. Результати випробувань ДСП 50x50x17 мм, на яких видно характерні особливості зони руйнування.



Рис. 22. Результати випробувань ХДФ 50x50x8 мм, на яких видно характерні особливості зони руйнування.



Рис. 23. Результати випробувань ХДФ 50x50x8 мм, на яких видно характерні особливості зони руйнування.



Рис. 24. Результати випробувань ХДФ 50х50х8 мм, на яких видно характерні особливості зони руйнування.

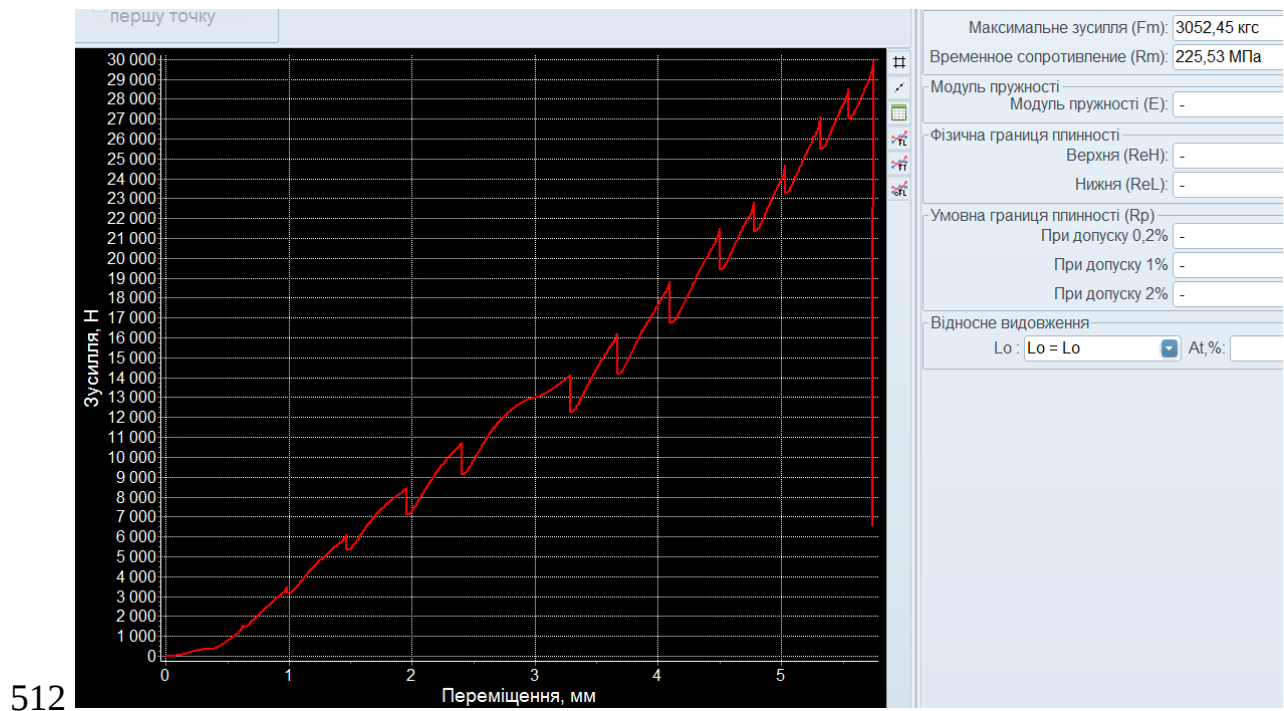


Рис. 25. Крива навантаження зони руйнування ХДФ 8 мм у координатах «Зусилля (Н) – Переміщення (мм)».

На рис. 26 показано графіки моделювання процесу реологічного вибуху в ХДФ 8 мм згідно з кінетичною моделлю (Патент України № 120865), рис. 7. Швидкість навантаження: $k1 = 2 \text{ мм/мин} = 0,0333 \text{ мм/с}$. $k2 = k1/3$. Прогноз часу руйнування згідно моделі: $t_f = 7/(2/60) = 210 \text{ с}$. Фактичний час руйнування $t_{f(\text{факт})} = 222 \text{ с}$, рис. 25.

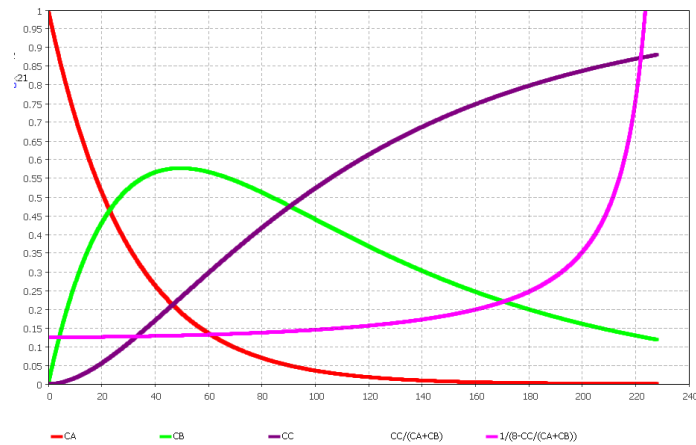


Рис. 26. Графіки моделювання процесу реологічного вибуху у ХДФ.

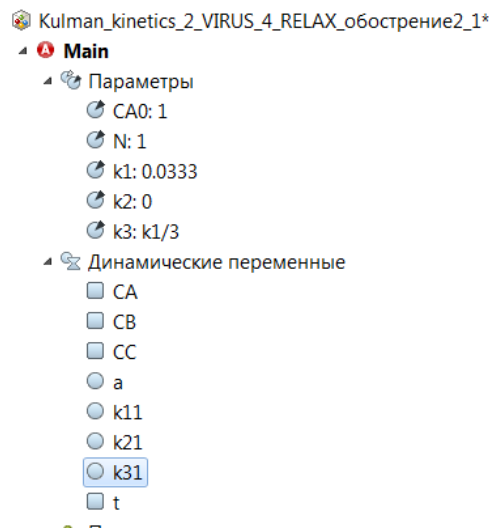


Рис. 27. Лістинг початкових умов та швидкостей зростання напружень згідно математичної моделі.

Аналіз отриманих натурних випробувань дозволяє зробити висновок про те, що при місцевому навантаженні деревини та деревних композитів відбувається поступове накопичення пошкоджень, які при їх спільній дії (тобто синергетиці) призводять до переходу в режим із загостренням, що є причиною реологічного вибуху.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Експериментально встановлено невідоме раніше явище вибухового характеру процесу деформування-руйнування при стиснутому стисканні деревини та композитів на її основі, яке обумовлено двостадійними реакціями переходу структурних елементів навантажуваних матеріалів з вихідного пружного стану в проміжний в'язко-пружний і потім якого протікає у режимі із загостренням.

2. Створено синергетичну математичну модель процесу реологічного вибуху у деревині та деревних композитах, яка враховує особливості реологічної поведінки деревин.

3. Проведено натурні випробування різних порід деревини та деревних композитів.

4. Результати натурних випробувань підтвердили адекватність математичної моделі реологічного вибуху на деревині з урахуванням її реологічних особливостей.

5. Проведені випробування підтвердили гіпотезу про те, що реологічний вибух у деревині це фазовий перехід за наявності зовнішнього постійного поля та дії зовнішніх «сильних» навантажень і є фазовим переходом першого роду.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bridgman P.W. // J. Phys. Rev. 1935. V. 48. P. 825.
2. Bridgman P.W. // J. Appl. Phys. 1937. V. 8. № 4. P. 328.
3. Meade C., Jeanloz R. // Nature. 1989. V. 339. P. 616.
4. Holzhausen G.R., Johnson A.M. // Tectonophysics. 1979. V. 58. № 3/4. P. 237.
5. Sleep N.H., Blanpied M.L. // Nature. 1992. V. 359. P. 687.
6. Регель В.Р., Слущер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая теория прочности твердых тел. М.: Наука, 1974.
7. Ярославский М.А. Реологический взрыв. М.: Наука, 1982.
8. Кечежян А.С. // Высокомолек. соедин. Б. 1984. Т. 26. № 2. С. 474.
9. Ениколопан Н.С. // Журн. физ. химии. 1989. Т. 63. № 9. С. 2289.
10. Aleksandrov A.I., Alexandrov I.A., Prokof'ev A.I., Bubnov N.N. // Russ. Chem. Bull. 1999. V. 48. № 9. P. 1599.
11. Александров А.И., Метленкова И.Ю., Зеленецкий А.Н., Прокофьев А.И., Солодовников С.П., Бубнов Н.Н. // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1997. № 9. С. 1622.
12. Александров И.А., Гриценко О.Т., Перов Н.С., Гетманова Е.В., Оболонкова Е.С., Серенко О.А., Шевченко В.Г., Александров А.И., Музафаров А.М. // Журн. техн. физики. 2013. Т. 83. № 1. С. 93.
13. Aleksandrov A.I., Alexandrov I.A., Prokof'ev A.I. // JETP Lett. 2013. V. 97. № 9. P. 546.
14. Aleksandrov A.I., Aleksandrov I.A., Zezin S.B., Degtyarev E.N., Dubinskiy A.A., Abramchuk S.S., A.I. Prokof'ev A.I. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2016. V. 10. №1. P. 69.
15. Aleksandrov A.I., Shevchenko V.G., Aleksandrov I.A. // JTP Lett. 2020. № 7. P. 43.
16. Aleksandrov A.I., Shevchenko V.G., Aleksandrov I.A. // Polymer Science A. 2018. V. 60. № 1. P. 74.

17. Englund, E.T.; Thygesen, L.G.; Svensson, S.; Hill, C.A.S. A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Wood Sci. Technol.* 2013, 47, 141–161. [CrossRef]
18. Venkateswaran, A. Sorption of aqueous and nonaqueous media by wood and cellulose. *Chem. Rev.* 1970, 70, 619–637. [CrossRef]
19. Skaar, C. Theories of water sorption by wood. In *Wood-Water Relations*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1988; pp. 86–121.
20. Siau, J.F. Basic Wood-Moisture Relationships. In *Transport Processes in Wood*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1984; pp. 1–34.
21. Hawley, L.F. Wood-Liquid Relations; Technical Bulletin 248; US Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 1931; pp. 1–34.
22. Tarkow, H. Interaction of Moisture and Wood; Report No. 2198; US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA, 1960; pp. 1–8.
23. Wangaard, F.F.; Wengert, E.M.; Mitchell, P.H.; Rosen, H.N.; Skaar, C.; Simpson, W.T.; Beall, F.C.; Spalt, H.A.; Arganbright, D.M.; Stewart, H.A.; et al. Proceedings of the Wood Moisture Content—Temperature and Humidity Relationships Symposium, Blacksburg, Virginia, 29 October 1979; Rosen, H.N., Simpson, W.T., Wengert, E.M., Eds.; USDA Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA, 1979.
24. Stamm, A.J. *Wood and Cellulose Science*; The Ronald Press Company: New York, NY, USA, 1964.
25. Glass, S.V.; Zelinka, S.L. Chapter 4. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In *Wood Handbook. Wood as an Engineering Material*; FPL-GTR-282; Ross, R.J., Ed.; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA, 2021.
26. Фенгель Д. Древесина (химия, ультраструктура, реакции): Пер. с англ. Фенгель Д., Вегенер Г. М.: Лесная пром-сть, 1988.

27. Білей П.В. Сушіння та захист деревини / П.В.Білей, В.М.Павлюст.- Львів:2008.-312 с.
28. Thybring, E.E.; Fredriksson, M.; Zelinka, S.L.; Glass, S.V. Water in Wood: A Review of Current Understanding and Knowledge Gaps. *Forests* 2022, 13, 2051. <https://doi.org/10.3390/f13122051>
29. Пінчевська О.О., Горбачова О.Ю. Захисне оброблення дерев'яних конструкцій. - К.: 2013 р. - 191 с.
30. Bitiй A., B. Marosvёльдь, 2012: A fajszi kísérleti Paulownia ültetvények újabb kutatási eredményei (Управління екологічними ресурсами та охорона та екологічна співпраця), Дослідницький центр Non-profit Ltd, Шопрон (в Угорщині).
31. Walker, J.C.F., Butterfield, B.G., 1996: Зміна основної щільності в межах молоді деревини ялини Сітка (*Picea sitchensis*), *New Zealand Journal of Forestry* 40(4): 34–40.
32. Zhang, S. Y. (1997): Взаємозв'язок питомої ваги деревини та механічних властивостей на рівні виду, *Wood Science and Technology* 31(3):181-191.
33. Мамонтов Е.А. Проектирование технологических процессов изготовления изделий деревообработки: учебное пособие / Е.А. Мамонтов, Ю.Ф. Стрежнев. – Санкт-Петербург: «ПрофиКС», 2006. – 581с.
34. Гончаров Н.А., Башинский В.Ю., Буглай Б.М. Технология изделий из древесины. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 528 с.
35. ГОСТ 1146-80. Шурупы с полупотайной головкой // ИПК издат. стандартов. М.: 1982, 4 с.
36. Прокопович Б.В. Основи проектування столярно-меблевих виробництв: Навч.посібник / Б. В. Прокопович - К.: ІЗМН Міносвіти України. 1998. – 303 с.

37. Мец В. О. Економічний аналіз фінансових результатів та фінансового стану підприємства: Навч. посібник. / В. О. Мец – К.: КНЕУ, 1999. – 132 с.
38. Баканов М. И. Теория экономического анализа / Баканов М.И., Шеремет А. Д. – М.: Финансы и статистика, 1997. – 416 с
39. Шеремет А. Д. Теория экономического анализа: Учебник. / А.Д. Шеремет – М.: Инфра-М, 2002. – 333 с.
40. Житна І.П. Економічний аналіз господарської діяльності підприємств / І. П. Житна – К.: Вища шк., 1992. Мец В. О. Економічний аналіз фінансових результатів та фінансового стану підприємства: Навч. посібник. / В. О. Мец – К.: КНЕУ, 1999. – 132 с.
41. ГОСТ 1759.4-87 Болты, винты и шпильки механические свойства и методы испытания // ИПК издат. Стандартов. – М: 1997 г., 10 с.
42. ГОСТ 16483.23-73 Древесина. Метод определения предела прочности при растяжении вдоль волокон // ИПК издат. Стандартов. – М: 1973 г., 11 с.
43. Электронный ресурс: <http://matemonline.com/metki/mathcad/>.
44. Пижурин А.А. Исследование процессов деревообработки. – М: Лесная промышленность, 1984 – 232с.
45. Билей П.В., Никитюк Л.А. и др. Основы научных исследований технологических процессов д/о. Конспект лекцій, Львів, 1994.
46. Л.О. Никітюк. Наукові дослідження в д/о. Львів: 1994; 1995; 1997.
47. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике: Учебник-монография / Д.А. Франк-Каменецкий. – 4-е изд. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. – 400 с.

ДОДАТКИ

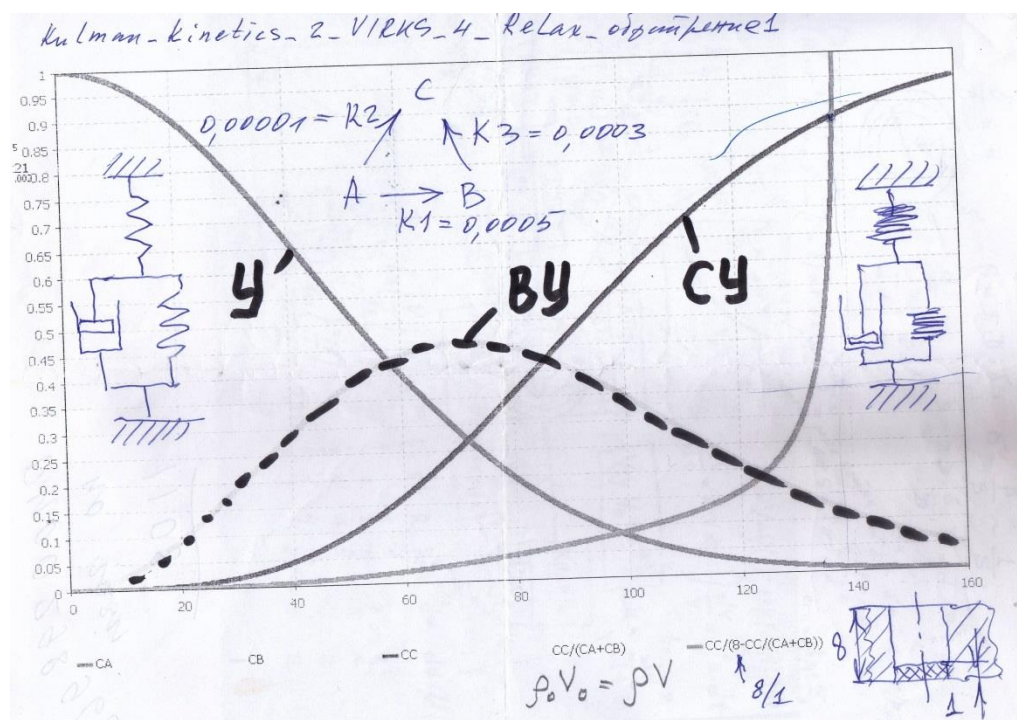


Рис. 29

Дата	№ про...	Образец	Описание
26.05.2021 1...	473	ДСП сжатие	18 мм
26.05.2021 1...	475	ДСП сжатие	18 мм
27.05.2021 1...	476	ДСП сжатие	18 мм
28.05.2021 1...	481	ДСП сжатие	18 мм
28.05.2021 1...	482	ДСП сжатие	18 мм
28.05.2021 1...	483	ДСП сжатие	18 мм
28.05.2021 1...	484	Пенопласт сжатие	3x20,4 мм
28.05.2021 1...	485	Термодревесин...	29,5 мм
28.05.2021 1...	486	Ламинат	5x7,35
28.05.2021 1...	487	Ламинат	1x7,35
29.05.2021 1...	488	Ламинат	1x7,35
29.05.2021 1...	489	MDF	26.98
29.05.2021 1...	489	MDF	26.98
29.05.2021 1...	490	ХДФ лам снизу	1x7
29.05.2021 1...	491	ХДФ лам снизу	1x7
29.05.2021 1...	492	ХДФ лам снизу	1x7
29.05.2021 1...	493	ХДФ лам снизу	1x7
31.05.2021 1...	494	ХДФ лам снизу	1x7
31.05.2021 1...	495	ХДФ лам снизу	1x7
31.05.2021 1...	496	ХДФ лам снизу	1x7
31.05.2021 1...	497	ХДФ лам снизу	1x7
31.05.2021 1...	498	Фреза	1x7
31.05.2021 1...	499	ХДФ лам снизу	1x7
31.05.2021 1...	500	ХДФ лам снизу	1x7
31.05.2021 1...	501	Пенопласт	20

Рис. 30.

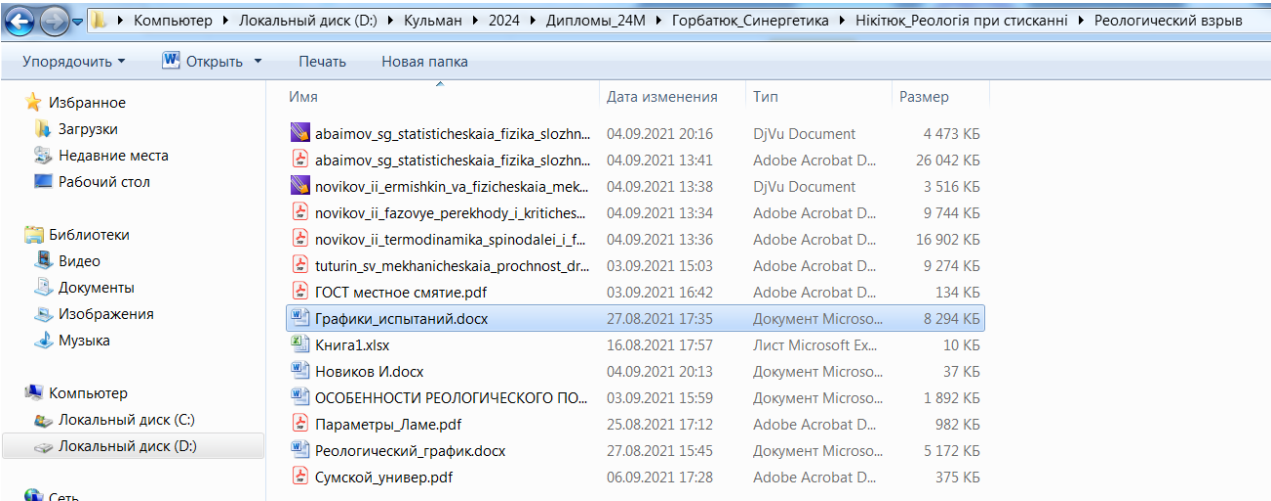


Рис. 31.