

Моделювання роботи дерев'яних балок модифікованих епоксидною смолою після впливу одноразових та малоциклових навантажень методом скінченних елементів

Ольга Гомон

Кафедра будівництва та цивільної інженерії, факультет архітектури, будівництва та дизайну,
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

ORCID 0009-0009-6488-8073

Анотація: В якості несучих конструкцій промислових та цивільних будівель і споруд, мостів та мостових переходів, тунелів, риштувань підземних шахт в більшості випадків застосовують хвойні породи деревини. До таких можна віднести смереку, ялицю, ялину, сосну, модрина та інші. В багатьох випадках такі конструкції мають працювати з підвищеними механічними характеристиками. Поліпшити властивості деревини можливо шляхом її модифікації. Є різні способи модифікації, які можуть підвищувати міцність деревини на 20-300%. Деякі з цих способів можна застосувати для модифікації несучих конструкцій, зокрема, балок, ферм, колон та інших.

Роботу елементів та конструкцій з деревини за різних навантажень та впливів можливо моделювати на основі методу скінченних елементів. Таке моделювання, як правило, проводилось для немодифікованих елементів та конструкцій. Нас же в даній роботі буде цікавити прогнозування та чисельне моделювання роботи цільних соснових дерев'яних балок модифікованих епоксидною смолою методом скінченних елементів після дії одноразових та малоциклових навантажень. Метою даних досліджень є моделювання роботи соснових дерев'яних балок прямокутного перерізу модифікованих епоксидною смолою після впливу одноразових та малоциклових навантажень методом скінченних елементів на основі механічних характеристик матеріалів.

Проведено чисельне моделювання роботи немодифікованих та модифікованих епоксидною смолою соснових балок прямокутного цільного перерізу перерізом 50x80x1650 мм після дії одноразових та малоциклових навантажень методом скінченних елементів в програмному комплексі ЛІРА САПР на основі механічних характеристик матеріалів. Встановлено напружено-деформований стан згинальних елементів з деревини сосни модифікованих епоксидною смолою та немодифікованих після дії одноразових та малоциклових навантажень. На основі проведеного чисельного моделювання досліджуваних згинальних елементів побудовано відповідно ізополі повздовжніх напружень, вертикальних переміщень, сколюючих напружень після дії одноразових та малоциклових навантажень. Встановлено, що на всіх рівнях завантаження відслідковувалось зменшення вертикальних переміщень в балках з використанням модифікованої епоксидною смолою деревини сосни цільного перерізу, як за одноразових навантажень, так і малоциклових. На основі проведеного чисельного моделювання визначено, що несуча здатність просочених епоксидною смолою дерев'яних балок цільного прямокутного перерізу значно зростає в порівнянні з непросоченими, як за одноразових навантажень, так і малоциклових.

В подальшому необхідно проводити експериментально-теоретичні дослідження за даним напрямком досліджень та провести порівняння з чисельним дослідженням, яке проведене в даній роботі.

Ключові слова: деревина, балка, робота, одноразове навантаження, малоциклове навантаження, епоксидна смола, напружено-деформований стан, скінченний елемент, прогин.

1. Вступ

Людство деревину як сировину почали використовувати тисячі років назад в різних сферах життєдіяльності. Досить широко застосовували в побуті, в тому числі і в будівництві, використовуючи її як основний будівельний матеріал. Наші предки зводили житлові будинки, дерев'яні храми, мости, мостові переходи, промислові підприємства, малі архітектурні форми. Наше покоління продовжує використовувати деревину в будівельному комплексі. Зокрема зводяться багатоповерхові житлові будинки, промислові об'єкти з величезних прольотів, сучасні дерев'яні мости та мостові переходи з досить великою протяжністю, часто використовують морські пірси, берегоукріплюючі споруди озер, ставків, дамб, а також тимчасові споруди різного призначення. Дуже часто використовується в гідротехнічному будівництві.

Основною перевагою деревини є те, що це є природний матеріал, його легко обробляти, з'єднувати, він має хорошу теплопровідність, невелику вагу в порівнянні з іншими матеріалами, такими як бетон, залізобетон, метал, іншими композитами, при правильній експлуатації є досить стійкий до агресивних середовищ, в тому числі лужних і кислотних.

Деревина є невід'ємним атрибутом сьогодення. Матеріали та вироби на основі деревини зустрічаються на кожному кроці і в більшості випадків є привабливими зовнішньо. Людство тисячі років використовує деревину за різним призначенням. Деревина є природним, відновлювальним матеріалом. Вона є екологічно чистим матеріалом і може експлуатуватися в середині приміщень. Її наявність в лісах залежить від самих людей. Деревина має свої неповторні унікальні властивості і тому її використовують практично у всіх галузях світової економіки. В якості несучих конструкцій промислових та цивільних будівель і споруд, мостів та мостових переходів, тунелів, риштувань підземних шахт в більшості випадків застосовують хвойні породи деревини. До таких можна віднести смереку, ялицю, ялину, сосну, модрина та інші. Хвойні породи в порівнянні з листяними є більш стійкими. Дані породи деревини в більшості випадків вирощують в північній та західній частині нашої країни. За кордоном часто використовують ще й інші породи деревини. В цілому, вік дерев в лісах зменшується, товарної деревини стає дедалі менше. Такі реалії спонукають людство до використання дерев меншого віку, що не завжди дає можливість в повній мірі реалізувати поставлені задачі. Тому деревину необхідно модифікувати.

Модифікована деревина також відіграє важливу роль у сучасному екологічному будівництві. Враховуючи глобальні тенденції до зменшення вуглецевого сліду та сталого розвитку, деревина, особливо з покращеними характеристиками, розглядається як перспективна альтернатива традиційним будівельним матеріалам. У багатьох країнах вже сьогодні впроваджуються програми стимулювання будівництва з використанням деревини, оскільки вона має низький рівень енергоспоживання при виробництві, порівняно з металом чи бетоном.

Сучасні технології модифікації дозволяють досягати нових властивостей, таких як вогнестійкість, біостійкість, водовідштовхувальні якості та навіть електроізоляційні характеристики. Особливо це важливо для об'єктів, які експлуатуються у складних кліматичних умовах, поблизу водойм, у вологих регіонах або на виробництвах зі специфічним середовищем.

Варто також зазначити, що інноваційні методи обробки деревини зменшують її усадку та розтріскування при висиханні, що раніше вважалося серйозним недоліком. Внаслідок цього підвищується термін експлуатації дерев'яних конструкцій та зменшуються витрати на технічне обслуговування й заміну окремих елементів.

Розвиток науково-технічного прогресу в галузі деревинознавства та матеріалознавства відкриває нові можливості для ефективнішого використання деревини у найрізноманітніших галузях — від транспортної інфраструктури до енергетики. Отже, деревина не лише зберігає

свої традиційні позиції, а й упевнено розширює сфери свого застосування, завдяки сучасним підходам до її удосконалення та модифікації.

В багатьох випадках несучі конструкції мають працювати з підвищеними механічними характеристиками та за різних умов і режимів експлуатації. Поліпшити властивості деревини можливо шляхом її модифікації. Є різні способи модифікації, які можуть підвищувати міцність деревини на 20-300%, модуль пружності, покращувати її жорсткість, зменшувати деформівні характеристики, поліпшувати та стабілізувати її фізичні показники. Деякі з цих способів можна застосувати для модифікації несучих конструкцій, зокрема, балок, ферм, колон та інших. Розрізняють поверхневу та глибинну модифікацію. Більш ефективним є автоклавне просочення різних полімерних композицій в тіло деревини, тобто глибинна модифікація, в тому числі хвойних порід. Але воно є більш трудомістким в порівнянні з поверхневим. Його не завжди можливо застосувати. В більшості випадків застосовують в заводських умовах. В торгівельних мережах можливо знайти різноманітні одно- та двокомпонентні композиційні матеріали для захисту та модифікації деревини. Також модифікацію застосовують і для мало цінних сортів деревини, тобто деревина, яка має дефекти, пошкодження, сучки. При цьому покращуються її основні фізико-механічні показники. Просочення також можливо використовувати при реконструкції та підсиленні різноманітних дерев'яних елементів та конструкцій, як в опалювальних і неопалювальних приміщеннях, так і під відкритим небом. Часто модифікатори одночасно можуть бути антисептиком, антипіреном та покращувати і стабілізувати фізико-механічні характеристики, що спрощує обробку та захист деревини.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є моделювання роботи балок прямокутного перерізу з цільної модифікованої епоксидною смолою та немодифікованої деревини сосни перерізом 50x80x1650 мм в програмному комплексі ЛІРА САПР на основі встановлених експериментальним шляхом раніше механічних характеристик матеріалів, тобто, тимчасової граничної міцності деревини сосни І сорту за стиску та розтягу вздовж волокон та їх відповідних модулів пружності з просоченням та без нього. Предметом досліджень є напружено-деформований стан згинальних елементів з деревини сосни модифікованих епоксидною смолою та немодифікованих після дії одноразових короткочасних та малоциклових навантажень. Було вибрано саме вплив малоциклових навантажень на напружено-деформований стан та роботу дерев'яних балок, оскільки вплив таких навантажень практично не вивчався на модифіковані епоксидною смолою автоклавним просоченням згинальні елементи, в тому числі методом скінчених елементів, тобто за допомогою сертифікованих програмних комплексів. Також повторні навантаження фактично найчастіше зустрічаються в інженерній практиці роботи та різних умов експлуатації будівельних елементів та конструкцій, які працюють в складі будівель та інженерних споруд. А такі програмні комплекси найбільше можуть врахувати особливості роботи просочених прямокутних балок цільного перерізу.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даних досліджень є моделювання роботи та напружено-деформованого стану соснових дерев'яних балок цільного прямокутного перерізу модифікованих автоклавним просоченням двокомпонентною полімерною композицією епоксидною смолою після впливу одноразових короткочасних та малоциклових навантажень методом скінчених елементів в програмному комплексі ЛІРА САПР на основі встановлених експериментальним шляхом раніше механічних характеристик матеріалів, тобто, тимчасової граничної міцності деревини сосни І сорту та їх відповідних модулів пружності. До основних задач наших чисельних

досліджень також можливо віднести наступні: а) розробити методикау чисельних досліджень моделювання роботи та напружено-деформованого стану просочених епоксидною смолою та непросочених соснових дерев'яних балок цільного прямокутного перерізу в програмному комплексі ЛІРА САПР після дії одноразових короткочасних та малоциклових навантажень; б) на основі чисельного моделювання побудувати відповідно ізополя повздовжніх напружень, вертикальних переміщень, сколюючих напружень після дії одноразових та малоциклових навантажень просочених та непросочених соснових балок цільного прямокутного перерізу; в) встановити динаміку зміни вертикальних переміщень в балках з використанням модифікованої двокомпонентною полімерною композицією деревини сосни цільного перерізу, як за одноразових навантажень, так і малоциклових; г) також визначити динаміку зміни напружень досліджуваних балок за вище наведених умов експлуатації.

4. Аналіз літератури

Елементи та конструкції на основі різноманітних матеріалів в багатьох випадках зазнають різних зовнішніх механічних впливів та можуть експлуатуватися в різних за агресивністю середовищах. Такі навантаження можуть бути постійними в часі та змінними. До змінних можна віднести тривалі, знакозмінні, циклічні та інші. В залежності від кількості циклів навантаження є малоциклові та багатоциклові [1-4]. Донедавна більшість експериментально-теоретичних досліджень, що стосувалися впливу малоциклових повторних навантажень на несучі елементи та конструкції, як правило, були виготовлені на основі бетону, залізобетону, фібробетону, металу або інших композитів [1, 2]. В меншій мірі проводилися дослідження впливу малоциклових навантажень на деревину, а також на дерев'яні елементи та конструкції цільного перерізу, клеєні та на основі шпону [3, 4]. В існуючих нормативних документах фактично відсутній поділ за тривалістю циклів [5]. Дане нормування фактично відсутнє в національних та європейських нормах з розрахунку елементів та конструкцій з деревини [6, 7]. І не зрозуміло як саме необхідно розраховувати такі елементи та конструкції після дії повторних навантажень.

Вплив малоциклових навантажень на несучу здатність, деформативність та жорсткість дерев'яних елементів та конструкцій зустрічається в наукових працях вітчизняних дослідників, зокрема Алексієвця В.І. [3] і Сасовського Т.А. [4]. Водночас, в роботі [3] автор експериментальним та теоретичним шляхом встановив вплив повторних навантажень на нагельні (цвяхові та болтові), а також клеєні з'єднання елементів дерев'яних конструкцій різних сортів деревини сосни. Кількість циклів та рівень навантаження були різними. Сасовський Т.А. [4] проводив експерименти клеєних та цільного прямокутного перерізу згинальних елементів, виготовлених на основі деревини сосни, за дії повторних малоциклових навантажень різної інтенсивності. Обидва дослідники встановили вплив циклічних повторних навантажень на міцність, деформативність та жорсткість досліджуваних зразків. Але в цих роботах фактично відсутні експериментально-теоретичні дослідження модифікованих різноманітними композиційними матеріалами дерев'яних елементів та конструкцій з різних порід листяних та хвойних порід деревини, в тому числі з використанням методів скінченних елементів, зокрема і в різноманітних спеціалізованих програмних комплексах.

В якості несучих елементів та конструкцій найчастіше використовують клеєну деревину, цільного перерізу та на основі шпону в залежності від призначення будівлі чи споруди, розмірів прольотів, довжини елементів конструкцій та їх поперечного перерізу, виду навантажень, типу агресивності середовища та багато інших не менш важливих факторів [8-10].

Для поліпшення фізико-механічних властивостей цільної та клеєної деревини проводять її модифікацію різними способами [11-14]. Це дозволяє збільшувати міцність та модуль пружності різних порід деревини, в деяких випадках зменшувати деформативність, покращувати та стабілізувати багато інших її фізичних показників, зокрема, після модифікації

двокомпонентною епоксидною смолою стають водостійкими, тобто, захищають деревину від вологи. В наших попередніх наукових працях ми детально аналізували та описували різноманітні способи модифікації [15, 16], які найчастіше застосовуються при просоченні деревини листяних та хвойних порід різних класів міцності. Є багато полімерних композицій, які дозволяють модифікувати деревину. Нас буде цікавити двокомпонентна полімерна композиція – епоксидна смола, яка часто застосовується в промисловості [17, 18], в тому числі і в деревообробній. Перевагою епоксидної смоли є те, що вона екологічно безпечна при експлуатації в закритих приміщеннях, немає додаткового запаху на відміну від інших композицій, має досить високий модуль пружності. Також перевагою даного двокомпонентного композиційного матеріалу є те, що він також захищає деревину від шкідників, гнилі, пожежі, агресивності середовища. Тобто, є також хорошим антисептиком та антипіреном, що значно розширяє потенціал даної полімерної композиції. Епоксидна смола як двокомпонентна полімерна композиція має ряд інших переваг в порівнянні з аналогами. Інші не менш важливі властивості та характеристики епоксидної смоли можемо знайти в роботах іноземних та вітчизняних дослідників [17, 18].

В попередніх наших наукових працях [19-21] ми наводили роботу модифікованої автоклавним способом епоксидною смолою цільної (сосни, модрини, ялини) та клеєної деревини хвойних порід зразків конструкційних розмірів перерізом 30x30x120 мм після дії одноразових короткочасних та малоциклових повторних навантажень. Верхній рівень малоциклового повторного навантаження становив $\eta_v=0,8$, а нижній - $\eta_n=0$. Кількість циклів становила $n=10$ шт. На одинадцятому циклі зразки доводились до руйнування. Було встановлено, що модифікація значно збільшує тимчасову граничну міцність деревини ялини, сосни, модрини цільного перерізу в межах 21-36%, які були випробувані за одноразових навантажень, клеєної деревини сосни зростає на 27%. Модулі пружності просочених епоксидною смолою зразків також зростають. При цьому деформівність дещо зменшується. За малоциклових повторних навантажень міцність та початковий модуль пружності також зростають тільки дещо в іншій пропорції. Деформативні показники падають. Також в даних наукових працях [19-21] наведено характер руйнування досліджуваних просочених епоксидною смолою та непросочених зразків деревини хвойних порід цільного перерізу та клеєної деревини сосни після впливу одноразових короткочасних та малоциклових навантажень з різною інтенсивністю циклів.

Роботу та напружено-деформований стан елементів та конструкцій з цільної, клеєної та на основі шпону деревини за різних навантажень та впливів можливо моделювати на основі методу скінченних елементів. У вітчизняній та закордонній літературі таке моделювання, як правило, донедавна проводилось для немодифікованих елементів та конструкцій тільки за обмежених умов експлуатації за допомогою спеціалізованих програмних комплексів. Фактично відсутнє чисельне дослідження роботи таких елементів та конструкцій після дії повторних малоциклових навантажень з різною кількістю симетричних циклів. Нас же в даній роботі буде цікавити прогнозування та чисельне моделювання роботи цільних соснових дерев'яних балок прямокутного перерізу модифікованих двокомпонентною епоксидною смолою та немодифікованих методом скінченних елементів після дії одноразових короткочасних та малоциклових навантажень програмними комплексами та визначення основних механічних характеристик досліджуваних згинальних елементів (різних напружень, переміщень та прогинів).

5. Методи досліджень

Для прогнозування роботи та напружено-деформованого стану соснових балок цільного прямокутного перерізу модифікованих епоксидною смолою та немодифікованих використаємо моделювання за допомогою методу скінченних елементів. До сучасних програмних комплексів, які використовують даний метод можна віднести наступні програмні

комплекси ЛІРА-САПР, ANSYS, Abaqus, Autodesk Robot та багато інших. Такі програмні комплекси дозволяють розраховувати висотні житлові та промислові протяжні будівлі, складні інженерні споруди, будівельні елементи і конструкції різної конфігурації, великих прольотів, фундаменти різного типу та багато інших складних інженерних систем. Суть такого моделювання полягає в поділу досліджуваного елемента на скінченні невеликі елементи. Зазвичай всі програми використовують певні алгоритми та етапи для розрахунку. До таких етапів можна віднести наступні: 1) етап, на якому розбивають досліджуваний елемент на невеликі частини з врахування геометричних розмірів досліджуваної конструкції; 2) описання фізико-механічних характеристик скінченних елементів, з яких складається досліджувана конструкція; 3) розрахунок самої конструкції; 4) аналіз отриманих результатів моделювання.

Отже, ЛІРА САПР — це сучасний програмний комплекс для розрахунку та проектування будівельних конструкцій, в тому числі дерев'яних. Він широко використовується інженерами-проектувальниками в галузі цивільного та промислового будівництва. Програма підтримує метод скінченних елементів (МСЕ) для моделювання різноманітних конструкцій. Забезпечує аналіз статичних і динамічних навантажень, включаючи сейсмічні дії. Має модулі для розрахунку залізобетонних, сталевих, дерев'яних конструкцій. Інтерфейс зручний для користувача, з підтримкою візуалізації результатів. Підтримується інтеграція з іншими САД-системами (наприклад, AutoCAD, Revit). Постійно оновлюється відповідно до сучасних норм проектування (ДБН, Eurocode). Доступна українською мовою. Підходить як для навчання, так і для професійного проектування сучасних будівель, споруд, фундаментів, будівельних конструкцій та елементів, в тому числі виготовлених на основі цільної, клеєної та модифікованої деревини. Даний програмний комплекс може враховувати різні види навантажень, які діють на конструкції та елементи, в тому числі і малоциклові, безпосередньо реальні умови роботи та інші не менш важливі фактори.

Для чисельного дослідження роботи і напружено-деформованого стану соснових дерев'яних балок цільного прямокутного перерізу модифікованих епоксидною смолою та немодифікованих створено дві геометричні моделі в програмному комплексі ПК ЛІРА САПР перерізом 50x80x1650 мм. Одне з головних правил моделювання в ПК ЛІРА САПР та інших програмних комплексах є правильне складання розрахункової схеми досліджуваної конструкції або так званої моделі. Було використано класичне моделювання роботи та напружено-деформованого стану досліджуваних згинальних елементів. Отже, в нашому випадку, балки були розбиті на скінченні елементи ділянкою в 1 см². Щоб правильно змодельовати опори, на відстані 75 мм від краю балок були використані у нижніх вузлах скінченних елементів в'язі, які блокують вертикальні переміщення (права та ліва опора) та горизонтальне переміщення (ліва опора). Навантаження до дерев'яних згинальних елементів прикладались симетрично двома силами утворюючи так звану зону «чистого згину». Відстань від прикладених в'язей до перпендикуляра прикладення сили з правої частини та лівої частини балки склала 500 мм, тому відстань між двома прикладеними силами складає 500 мм. Отже, моделювання роботи та напружено-деформованого стану всіх досліджуваних балок проводилося згідно діючих стандартів і нормативних документів (ДБН, Eurocode) [5-7] та з врахуванням дійсних умов роботи таких елементів.

Основні фізико-механічні характеристики модифікованої епоксидною смолою та немодифікованої деревини сосни після впливу одноразових короткочасних та малоциклових навантажень були встановлені в попередніх наших роботах, де, зокрема, були визначені тимчасова гранична міцність та відповідні модулі пружності всіх досліджуваних зразків [19, 20]. Змодельовані балки, як уже зазначено вище, виконано з немодифікованої деревини сосни цільного перерізу та з модифікованої автоклавним просоченням епоксидною смолою. Після встановлення жорсткостей скінченних елементів було проведено статичний розрахунок змодельованих просочених та непросочених соснових дерев'яних згинальних елементів цільного прямокутного перерізу після впливу одноразових короткочасних та малоциклових повторних навантажень.

6. Результати досліджень

В результаті проведеного детального моделювання, а згодом і розрахунку, в програмному комплексі ЛІРА САПР встановлено напружено-деформований стан досліджуваних просочених епоксидною смолою та непросочених соснових балок цільного перерізу після дії одноразових короткочасних та малоциклових повторних навантажень.

На основі проведеного чисельного дослідження отримано ізополя повздовжніх напружень для модифікованих та немодифікованих згинальних елементів прямокутного цільного перерізу 50x80x1650 мм після дії одноразових короткочасних навантажень (рис. 1).

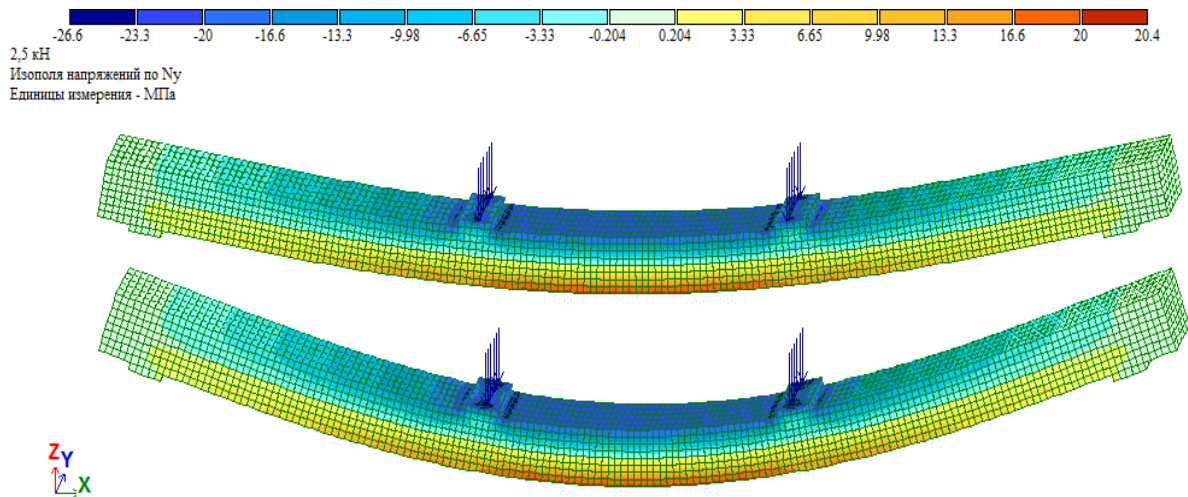


Рис 1. Ізополя повздовжніх напружень соснових балок прямокутного цільного перерізу після дії одноразового короткочасного навантаження: а) з модифікацією епоксидною смолою; б) без модифікації.

А також на основі чисельного моделювання в даному програмному комплексі побудовано ізополя вертикальних переміщень (рис. 2) після впливу тих же одноразових короткочасних навантажень. Отримані ізополя (рис. 1, рис. 2) змодельовані на основі дійсних механічних характеристик матеріалів (тимчасової граничної міцності та модуля пружності), які були встановлені в результаті проведених нами раніше експериментальних досліджень [19, 20].

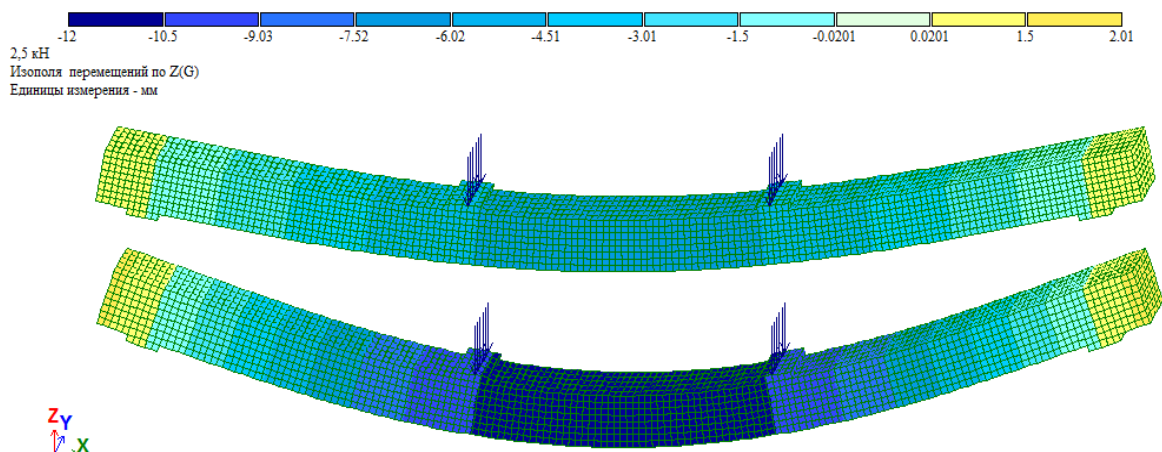


Рис 2. Ізополя вертикальних переміщень соснових балок прямокутного цільного перерізу після дії короткочасного одноразового навантаження: а) з модифікацією епоксидною смолою; б) без модифікації.

Отже, проведений розрахунок просочених двокомпонентною епоксидною смолою та непросочених соснових балок цільного прямокутного перерізу проводився в діапазоні від 0,5 кН до 3,0 кН. Прийнятий крок в 0,5 кН. На всіх рівнях завантаження відслідковувалось зменшення вертикальних переміщень в досліджуваних балках з використанням фізико-механічних властивостей модифікованої деревини, які отримані в результаті проведення попередніх наших експериментальних досліджень просочених та непросочених зразків-близнюків [19, 20]. Отже, аналізуючи рис. 2 було встановлено, що при цьому зменшення вертикальних переміщень складає приблизно 43%.

При моделюванні роботи та напружено-деформованого стану були отримані також напруження, які діють вздовж волокон деревини для модифікованих та немодифікованих досліджуваних соснових балок. Вони мають фактично однакові значення. Проте враховуючи наші попередні експериментальні дослідження механічних характеристик модифікованої та немодифікованої деревини сосни [19, 20] граничні значення напружень для досліджуваних балок будуть звичайно різними. Граничне значення для модифікованої епоксидною смолою деревини має більше значення тимчасової граничної міцності ніж немодифікованої, тому просочені балки можуть сприймати набагато більші навантаження ніж непросочені.

Змодельовані значення прогинів та напружень досліджуваних просочених та непросочених балок з цільної деревини прямокутного перерізу після дії одноразових навантажень записані та наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Результати моделювання роботи немодифікованих та модифікованих епоксидною смолою соснових балок цільного прямокутного перерізу за допомогою методу скінчених елементів

Навантаження, кН	Прогин, мм		Зусилля, МПа			
	Сосна	Сосна (модифікована)	Стиску		Розтягу	
			Сосна	Сосна модифікована	Сосна	Сосна модифікована
0,5	2,41	1,36	4,08	4,08	4,08	4,08
1,0	4,82	2,72	8,16	8,16	8,16	8,16
1,5	7,23	4,08	12,2	12,2	12,2	12,2
2,0	9,64	5,44	16,3	16,3	16,3	16,3
2,5	12,0	6,77	20,4	20,4	20,4	20,4
3,0	14,5	8,18	24,5	24,5	24,5	24,5

Аналогічно проведено моделювання роботи та напружено-деформованого стану, а також здійснено розрахунок згинальних елементів після впливу малоциклового навантаження в програмному комплексі ЛІРА САПР.

На основі чисельного дослідження в даному програмному комплексі було побудовано ізополя напружень та ізополя вертикальних переміщень досліджуваних просочених епоксидною смолою та непросочених соснових балок цільного перерізу на основі нами отриманих механічних характеристик немодифікованої та модифікованої деревини сосни (рис. 3).

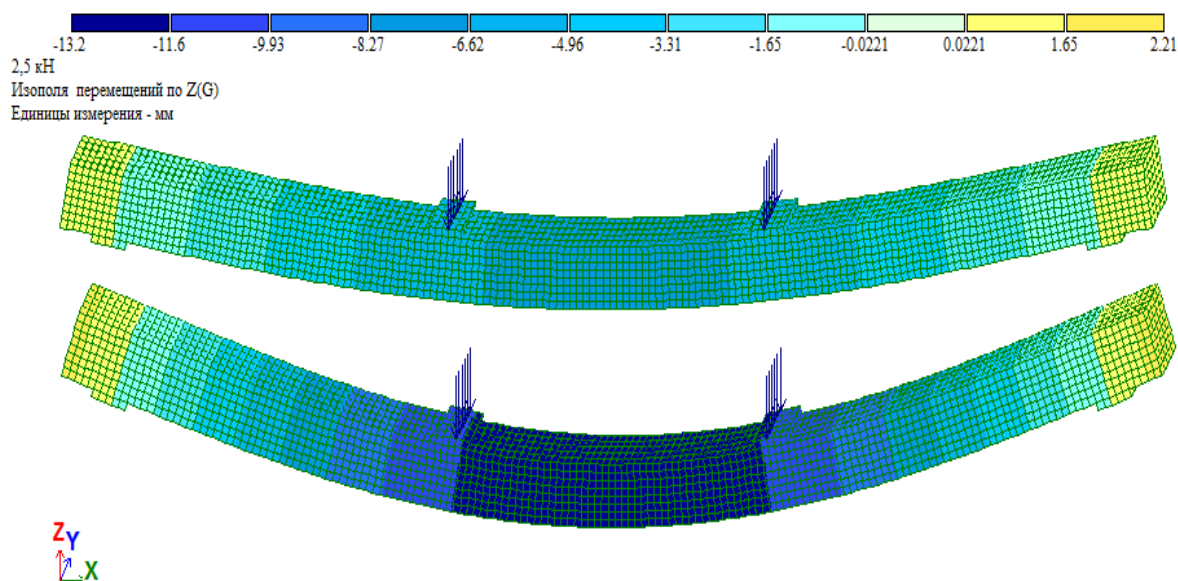


Рис 3. Ізополю вертикальних переміщень соснових балок прямокутного цільного перерізу після дії малоциклового навантаження: а) з модифікацією епоксидною смолою; б) без модифікації.

На основі проведених нами чисельних досліджень було визначено вплив малоциклового навантаження на прогини досліджених згинальних елементів (таблиця 2). Після порівняння встановлено, що для деревини сосни після дії малоциклового навантаження прогин балок з немодифікованої деревини збільшився на 10%, а для балок з модифікованої деревини епоксидною смолою автоклавним просоченням – лише на 4,1%.

Таблиця 2. Порівняння прогинів балок цільного прямокутного перерізу з модифікованої епоксидною смолою та немодифікованої деревини сосни

Навантаження, кН	Прогин, мм			
	немодифікована сосна		модифікована сосна (епоксидна смола)	
	одноразове навантаження	малоциклове навантаження	одноразове навантаження	малоциклове навантаження
0,5	2,41	2,65	1,36	1,42
1,0	4,82	5,30	2,72	2,83
1,5	7,23	7,95	4,08	4,25
2,0	9,64	10,60	5,44	5,66
2,5	12,0	13,2	6,77	7,05
3,0	14,5	15,9	8,18	8,52

На основі проведеного чисельного моделювання в програмному комплексі ЛІРА САПР роботи просочених епоксидною смолою та непросочених соснових балок цільного прямокутного перерізу побудовано ізополю сколюючих напружень після впливу одноразових короточасних навантажень (рис.4).

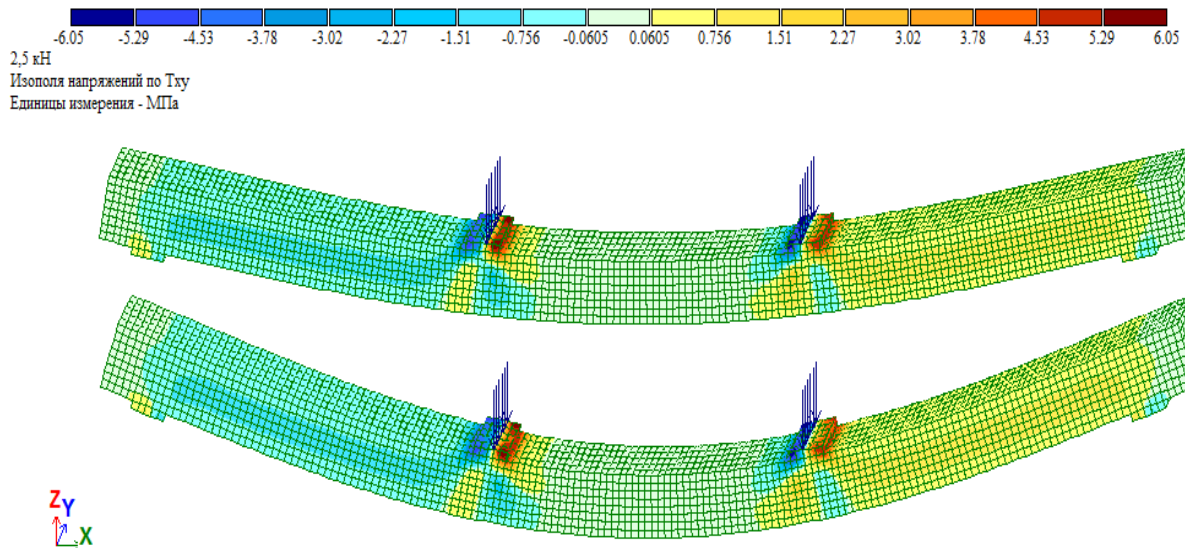


Рис 4. Изополя сколюющих напряжений сосновых балок прямоугольного цельного перерізу після дії одноразового короткочасного навантаження: а) з модифікацією епоксидною смолою; б) без модифікації.

Також в цьому ж програмному комплексі було отримано ізополя сколюющих напряжень модифікованих та немодифікованих згинальних елементів прямокутного цілого перерізу після дії малоциклового навантаження (рис. 5).

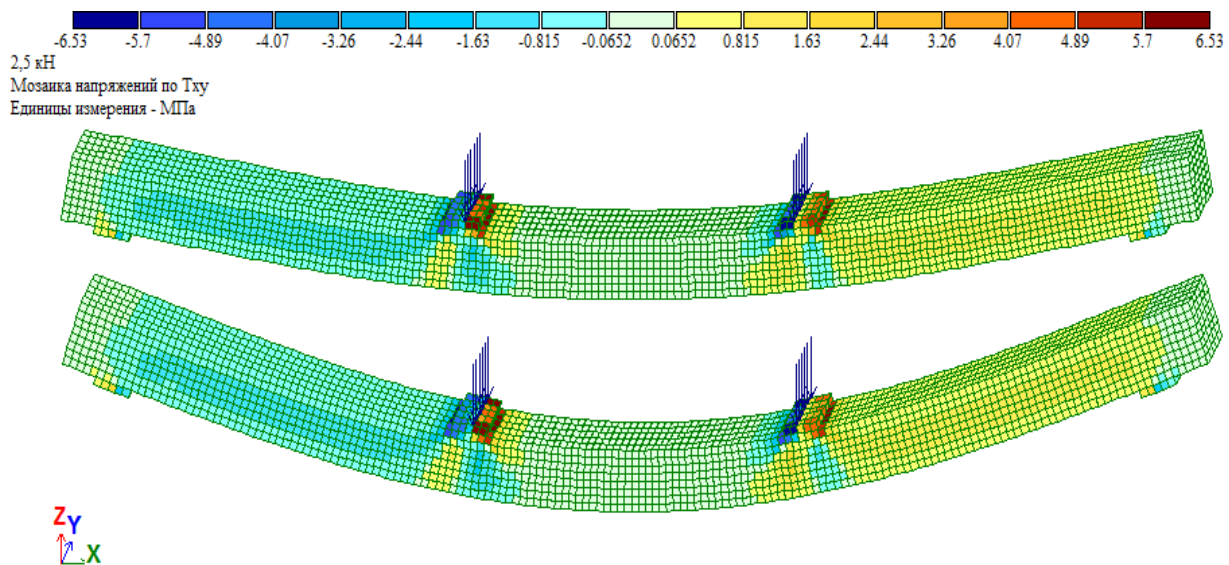


Рис 5. Изополя сколюющих напряжений сосновых балок прямоугольного цельного перерізу після дії малоциклового навантаження: а) з модифікацією; б) без модифікації.

Отже, приходимо до висновку, що моделювання роботи в програмних комплексах методом скінченних елементів значно спрощує розрахунок будівельних елементів та конструкцій, в тому числі і дерев'яних. Такі програмні комплекси дозволяють змодельовати роботу елементів та конструкцій за особливих умов експлуатації, зокрема при дії малоциклових навантажень. Вперше було змодельовано роботу та напружено-деформований стан соснових дерев'яних балок цілого прямокутного перерізу модифікованих автоклавним просоченням двокомпонентною полімерною композицією епоксидною смолою після впливу одноразових короткочасних та малоциклових навантажень методом скінчених елементів в програмному комплексі ЛІРА САПР на основі встановлених експериментальним шляхом раніше механічних характеристик матеріалів, тобто, тимчасової граничної міцності деревини

сосни I сорту та їх відповідних модулів пружності. Також були визначені всі механічні характеристики всіх нами досліджуваних просочених балок.

Після числового моделювання в програмному комплексі ЛПРА САПР встановлено, що модифікація автоклавним просоченням соснових балок значно збільшує її несучу здатність, зменшує прогини та деформативні показники, як за одноразових короткочасних навантажень, так і за малоциклових, в порівнянні з необробленими згинальними елементами такого ж перерізу.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Враховуючи аналіз результатів проведених чисельних досліджень роботи і напружено-деформованого стану модифікованих епоксидною смолою та немодифікованих цільних соснових дерев'яних балок прямокутного перерізу після дії одноразових та малоциклових навантажень, варто було б провести досить широкомасштабні експериментально-теоретичні дослідження таких згинальних елементів та верифікувати отримані результати. Також в подальшому необхідно було б провести експериментально-теоретичні дослідження просочених епоксидною смолою автоклавним способом та непросочених балок цільного перерізу прямокутної форми, які виготовлені, в тому числі, з деревини ялини та модрина. Та паралельно змодельовати роботу та напружено-деформований стан таких згинальних елементів методом скінченних елементів в програмному комплексі ЛПРА САПР за дії одноразових та малоциклових повторних навантажень, визначивши при цьому основні механічні характеристики. Такі ж експериментально-теоретичні дослідження було б доцільно провести і для клеєних дерев'яних балок, виготовлених з хвойних порід деревини сосни, ялини та модрина, які застосовуються як несучі конструкції при зведенні цивільних та промислових будівель, а також різного призначення інженерних споруд. Ще в подальших дослідженнях було б доцільно виявити вплив різних агресивних середовищ (водних, лужних, сольових, кислотних) на модифіковані двокомпонентною епоксидною смолою автоклавним просоченням цільних, клеєних та на основі шпону дерев'яних балок та інших будівельних елементів і конструкцій з різних хвойних порід деревини. Оскільки, епоксидна смола, на нашу думку, може захищати деревину від різноманітних агресивних середовищ різної інтенсивності.

8. Висновки

1) Проведено чисельне моделювання роботи немодифікованих та модифікованих епоксидною смолою соснових балок прямокутного цільного перерізу після дії одноразових та малоциклових навантажень методом скінченних елементів в програмному комплексі ЛПРА САПР на основі механічних характеристик матеріалів;

2) На основі проведеного чисельного моделювання досліджуваних згинальних елементів побудовано відповідно ізополі повздовжніх напружень, вертикальних переміщень, сколюючих напружень після дії одноразових та малоциклових навантажень;

3) Встановлено, що на всіх рівнях завантаження відслідковувалось зменшення вертикальних переміщень в балках з використанням модифікованої епоксидною смолою деревини сосни цільного перерізу, як за одноразових навантажень, так і малоциклових;

4) На основі проведеного чисельного моделювання визначено, що несуча здатність просочених епоксидною смолою дерев'яних балок значно зростає в порівнянні з непросоченими, як за одноразових навантажень, так і малоциклових;

5) В подальшому необхідно проводити експериментально-теоретичні дослідження за даним напрямком досліджень та провести порівняння з чисельним дослідженням, яке проведене в даній роботі.

Список літератури:

- 1) Панчук Ю.М. (2018). Методика досліджень та робота згинальних елементів зі змішаним армуванням за малоциклових навантажень високих рівнів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, 36, 165-171.
- 2) Масюк Г.Х., Ющук О.В., Федюк М.А. (2019). Експериментальні дослідження перерозподілу зусиль у двохпролітних нерозрізних балках за дії малоциклових і знакозмінних навантажень. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 11, 73–83.
- 3) Алексієвець В.І. (2011). Робота та розрахунок сталевих нагельних з'єднань дерев'яних конструкцій за повторних навантажень: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Рівне, 21.
- 4) Сасовський Т.А. (2018). Напружено-деформований стан балок із клеєної деревини за дії малоциклових навантажень: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Рівне, 200.
- 5) ДБН В.1.2-2:2006 (2020). "Навантаження і впливи. Норми проектування", 68.
- 6) ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення, 111.
- 7) Eurocode 5. (1995). Design of timber structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings, 124.
- 8) Гомон, О.О., Чапюк, О.С., Савчук, С.М. (2024). Використання клеєної деревини у промисловості. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 22, 15–22.
- 9) Гомон, О.О., Чапюк, О.С., Савчук, С.М. (2024). Особливості застосування клеєної деревини. Інноваційні процеси в галузі дорожнього будівництва: збірник тез доповідей II міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів, 6 листопада 2024 року, м. Луцьк. Луцьк: ЛНТУ, 26-27.
- 10) Anshari, B., Guan, Z. W., Wang, Q. Y., 2017. Modelling of Glulam beams pre-stressed by compressed wood. *Composite Structures*, 165, 160–170.
- 11) Hill C. (2011). Wood modification: An update. *BioResources*, 6 (2), 918–919.
- 12) Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G. (2017). Wood modification technologies - a review. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10(6), 895-908.
- 13) Цапко Ю.В., Ліхнівський Р.В. Дослідження структури модифікованої деревини. *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*, 49, 170–174.
- 14) Пінчевська О.О., Горбачова О.Ю. Властивості термомодифікованої деревини граба. *Сучасні будівельні конструкції з металу, деревини та пластмас*, 21, 71-77.
- 15) Довбенко, Т.О., Петренко, О.В., Чапюк, О.С., Гомон, О.О. (2024). Аналіз способів модифікування деревини. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*, 4(108), 12-20.
- 16) Гомон, О.О. (2025). Поверхневі та глибинні способи модифікування деревини. X Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування»: матеріали конференції (тези), 27-30 травня 2025 року, м. Луцьк. Луцьк: ЛНТУ, 66.
- 17) Kashytskyi V. P., Sadova O. L., Melnychuk M. D., Golodyuk G. I., Klymovets O. B. (2023). Structuring of modified epoxy composite materials by infrared spectroscopy. *Journal of Engineering Sciences*, 10(1), 9-16.
- 18) Buketov, A., Stukhlyak, P., Maruschak, P., Panin, S., Menou, A. (2016). Physical and chemical aspects of formation of epoxy composite material with microfilling agent. *Physical Key Engineering Material*. 712, 143-148.
- 19) Чапюк, О.С., Гомон, О.О., Петренко, О.В. (2025). Особливості роботи модифікованої епоксидною смолою деревини хвойних порід. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 395–402.
- 20) Чапюк, О.С., Гомон, О.О., Петренко, О.В. (2025). Підвищення міцності хвойних порід деревини шляхом модифікації епоксидною смолою. Інновації у будівництві: збірник тез доповідей X міжнародної науково-практичної інтернет-конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених, 15 травня 2025 року, м. Луцьк. Луцьк: ЛНТУ, 79-81.

21) Чапюк О.О., Гомон О.О. (2025). Особливості роботи модифікованої епоксидною смолою клеєної деревини сосни за одноразових та малоциклових навантажень. Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини», 12-14 червня 2025 року, м. Одеса. Одеса: ОДАБА, 69-70.

Modeling the operation of wooden beams modified with epoxy resin after exposure to single and low-cycle loads using the finite element method

Olha Homon

Department of Construction and Civil Engineering, Faculty of Architecture, Construction and Design, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
ORCID 0009-0009-6488-8073

Abstract: As load-bearing structures of industrial and civil buildings and structures, bridges and bridge crossings, tunnels, scaffolding of underground mines, in most cases coniferous wood species are used. These include spruce, fir, fir, pine, larch and others. In many cases, such structures must work with increased mechanical characteristics. It is possible to improve the properties of wood by modifying it. There are various methods of modification that can increase the strength of wood by 20-300%. Some of these methods can be used to modify load-bearing structures, in particular, beams, trusses, columns and others.

The operation of elements and structures made of wood under various loads and influences can be modeled based on the finite element method. Such modeling, as a rule, was carried out for unmodified elements and structures. In this work, we will be interested in the prediction and numerical modeling of the operation of solid pine wooden beams modified with epoxy resin by the finite element method after the action of single and low-cycle loads. The purpose of these studies is to model the operation of rectangular pine wooden beams modified with epoxy resin after the action of single and low-cycle loads by the finite element method based on the mechanical characteristics of materials.

Numerical modeling of the operation of unmodified and epoxy resin-modified rectangular pine beams with a cross section of 50x80x1650 mm after the action of single and low-cycle loads by the finite element method in the LIRA SAPR software package based on the mechanical characteristics of materials. The stress-strain state of bending elements made of pine wood modified with epoxy resin and unmodified after the action of single and low-cycle loads was established. Based on the numerical simulation of the studied bending elements, isofields of longitudinal stresses, vertical displacements, and shear stresses were constructed, respectively, after the action of single and low-cycle loads. It was established that at all loading levels, a decrease in vertical displacements was observed in beams using epoxy-modified pine wood of solid cross-section, both under single and low-cycle loads. Based on the numerical simulation, it was determined that the bearing capacity of epoxy-impregnated wooden beams of solid rectangular cross-section increases significantly compared to unimpregnated ones, both under single and low-cycle loads.

In the future, it is necessary to conduct experimental and theoretical studies in this area of research and to compare them with the numerical study conducted in this work..

Keywords: wood, beam, work, single load, low-cycle load, epoxy resin, stress-strain state, finite element, deflection.
