

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Св.Св. Гомон, П.В. Ясній, П.С. Гомон, В.П. Ясній

**КЛАСИЧНА МОДЕЛЬ
ДІЙСНОЇ РОБОТИ СУЦІЛЬНОЇ
ТА МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ
ОСЬОВИМ СТИСКОМ
ВЗДОВЖ ВОЛОКОН**

Монографія

*Присвячується пам'яті професора
Яснія Петра Володимировича*

*Видавництво
"Волинські обереги"*



2023

УДК 539.3

К-47

Рекомендовано до видання вченою радою Тернопільського національного
технічного університету імені Івана Пулюя
(Протокол №2 від 21 лютого 2023 року)

Рецензенти:

Мікуліч О.А., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету;

Мельник І.В., доктор технічних наук, професор кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська Політехніка».

Гомон Св.Св., Ясній П.В., Гомон П.С., Ясній В.П.

К-47 Класична модель дійсної роботи суцільної та модифікованої деревини осьовим стиском вздовж волокон: монографія. Рівне: Волинські обереги, 2023. 316 с.

ISBN 978-966-416-992-6

У монографії висвітлені нові результати експериментально-теоретичних досліджень суцільної, клеєної та модифікованої деревини осьовим стиском вздовж волокон за жорсткого режиму випробувань. Запропоновано класичну модель дійсної роботи таких матеріалів за короткочасного навантаження. Встановлено чотири характерні ділянки роботи деревини (дві на висхідній вітці, дві на спадній). Запропоновано теоретичне визначення основних міцнісних та деформівних параметрів повної діаграми деформування суцільної, клеєної та модифікованої деревини, зокрема, критичних та граничних деформацій, початкового модуля пружності та модуля деформацій.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, аспірантів, магістрів та студентів технічного спрямування.

УДК 539.3

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1. СТАН ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОТИ СУЦІЛЬНОЇ ДЕРЕВИНИ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇЇ ОСНОВІ	14
1.1. Будова суцільної деревини	14
1.2. Основні дефекти та пошкодження деревини	17
1.3. Чинники, що впливають на міцнісні та деформівні властивості деревини	19
1.4. Сучасне випробувальне обладнання	25
1.5. Експериментальні дослідження діаграм «напруження σ_c - деформації u_c » за м'якого та жорсткого режиму випробувань	29
1.6. Критичні деформації суцільної деревини та композицій- них матеріалів на її основі	37
1.7. Граничні деформації суцільної деревини та композицій- них матеріалів на її основі	40
1.8. Модулі пружності деревини та композиційних матеріалів на її основі	41
1.9. Клеєна деревина	45
1.9.1. Міцність суцільних клеєних з'єднань	46
1.9.2. Експериментальні дослідження клеєної деревини на стиск вздовж волокон	47
1.10. Модифікована деревина	48
1.10.1. Способи модифікації деревини	48
1.10.2. Експериментальні дослідження модифікованої деревини	50
1.10.3. Речовини для модифікації деревини	54
1.11. Аналіз залежностей для побудови повних діаграм меха- нічного стану деревини « σ_c - u_c »	56

1.12. Висновки до першого розділу	59
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТА ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	61
2.1. Вибір розмірів зразків	61
2.2. Вибір деревини для випробувань	62
2.3. Виготовлення дослідних зразків	65
2.4. Силове обладнання для проведення експерименту	65
2.5. Програма та об'єм експериментальних досліджень	68
2.5.1. Перша серія випробувань. Дослідження суцільної деревини	68
2.5.2. Друга серія випробувань. Дослідження клеєної деревини	74
2.5.3. Третя серія випробувань. Дослідження клеєної та клеєної модифікованої деревини	76
2.5.4. Четверта серія випробувань. Дослідження модифікованої суцільної деревини	77
2.6. Полімерна композиція «силор»	79
2.7. Методика експериментальних досліджень за жорсткого та м'якого режиму прикладення навантажень	81
2.7.1. Експериментальні дослідження за жорсткого режиму прикладення навантажень	81
2.7.2. Експериментальні дослідження за м'якого режиму прикладення навантажень	82
2.8. Повна діаграма деформування суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі осьовим стиском вздовж волокон	83
2.9. Апроксимація діаграм деформування «напруження-деформації» деревини та композиційних матеріалів на її основі	84
2.10. Критичні деформації суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі	91
2.11. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі	96
2.12. Граничні деформації суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі	99

2.13. Висновки до другого розділу	102
РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА ДІЙСНИХ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ ХВОЙНИХ ТА ЛИСТЯНИХ ПОРІД СУЦІЛЬНОЇ ДЕРЕВИНИ КОНСТРУКЦІЙНИХ РОЗМІРІВ « σ_c-u_c » З ВРАХУВАННЯМ ФАКТОРА ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ.....	105
3.1. Аналіз дійсної (повної) діаграми деформування деревини « σ_c-u_c » короткочасного одноразового стиску уздовж воло- кон за жорсткого режиму випробувань	105
3.2. Вплив вологості на міцнісні та деформівні властивості суцільної деревини хвойних та листяних порід за повз- довжнього стиску (I серія випробувань)	108
3.2.1. Дослідження суцільної деревини вологістю 30 %	109
3.2.1.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформу- вання «напруження-деформації» за повз- довжнього одноразового стиску	109
3.2.1.2. Початковий модуль пружності та модуль де- формацій (січний) за повздовжнього одно- разового стиску	112
3.2.1.3. Критичні деформації суцільної деревини за повздовжнього одноразового стиску	114
3.2.1.4. Граничні відносні деформації суцільної де- ревини за повздовжнього одноразового ко- роткочасного стиску.....	116
3.2.1.5. Апроксимація діаграм механічного стану деревини за одноразового повздовжнього стиску	119
3.2.2. Дослідження суцільної деревини вологістю 21%	123
3.2.2.1. Побудова дійсних (повних) діаграм дефор- мування «напруження σ_c -деформації u_c » за повздовжнього одноразового стиску	123
3.2.2.2. Початковий модуль пружності та модуль де- формацій (січний) за стиску вздовж волокон.....	127
3.2.2.3. Критичні деформації суцільної деревини за вологості 21%	129

3.2.2.4. Граничні відносні деформації суцільної деревини за повздовжнього стиску за вологості 21%.....	132
3.2.2.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження-деформації» за стиску вздовж волокон	136
3.2.3. Дослідження суцільної деревини хвойних та листяних порід вологістю 12% віком 60 років	139
3.2.3.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c ».....	139
3.2.3.2. Визначення початкового модуля пружності деревини та модуля деформацій (січного)	143
3.2.3.3. Критичні відносні деформації суцільної деревини за стандартної вологості 12% віком 60 років.....	143
3.2.3.4. Граничні деформації за стандартної вологості 12% віком 60 років	145
3.2.3.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження-деформації» за стандартної вологості 12% віком 60 років	149
3.3. Взаємозв'язок вологості з основними міцнісними та деформівними параметрами діаграми «напруження σ_c – деформації u_c »	153
3.4. Поліпшення основних міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини листяних та хвойних порід внаслідок її сушіння.....	158
3.5. Висновки до третього розділу	165

РОЗДІЛ 4. ПОБУДОВА ДІЙСНИХ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ ХВОЙНИХ ТА ЛИСТЯНИХ ПОРІД СУЦІЛЬНОЇ ДЕРЕВИНИ КОНСТРУКЦІЙНИХ РОЗМІРІВ « σ_c - u_c » ІЗ ВРАХУВАННЯМ ФАКТОРА ВІКУ	167
---	-----

4.1. Вплив віку на міцнісні та деформівні властивості суцільної деревини (I серія випробувань)	167
4.1.1. Визначення основних міцнісних та деформівних властивостей деревини віком 40 років	167

4.1.1.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c ».....	168
4.1.1.2. Початковий модуль пружності деревини та модуль деформацій (січний) деревини у віці 40 років.....	170
4.1.1.3. Критичні відносні деформації суцільної деревини у віці 40 років.....	172
4.1.1.4. Граничні деформації суцільної деревини у віці 40 років.....	175
4.1.1.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c » у віці 40 років.....	179
4.1.2. Визначення основних міцнісних та деформівних властивостей деревини віком 20 років.....	183
4.1.2.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c –деформації u_c » віком 20 років.....	183
4.1.2.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) віком 20 років.....	185
4.1.2.3. Критичні деформації деревини віком 20 років.....	187
4.1.2.4. Граничні відносні деформації суцільної деревини за повздовжнього стиску віком 20 років.....	190
4.1.2.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c –деформації u_c ».....	194
4.2. Взаємозв'язок фактора віку з основними міцнісними та деформівними параметрами діаграми «напруження σ_c – деформації u_c ».....	197
4.3. Динаміка зміни основних міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини від її віку.....	202
4.4. Висновки до четвертого розділу.....	205
РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ СУЦІЛЬНОЇ ДЕРЕВИНИ.....	206

5.1. Клеєна деревина (II серія випробувань)	206
5.1.1. Дослідження роботи клейових з'єднань деревини за сколювання вздовж волокон	206
5.1.2. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c »	208
5.1.3. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний)	212
5.1.4. Критичні деформації	214
5.1.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c »	217
5.1.6. Поліпшення міцнісних та деформівних властивостей клеєної деревини.....	219
5.2. Клеєна модифікована деревина за м'якого режиму випробувань (III серія випробувань).....	221
5.2.1. Визначення оптимального часу просочення полімерної композиції «силор» в тіло деревини за поверхневої модифікації	222
5.2.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний)	224
5.2.3. Деформівність клеєної деревини модифікованої полімерною композицією «силор»	226
5.3. Суцільна деревина модифікована полімерною композицією «силор» за жорсткого режиму випробувань (IV серія випробувань)	228
5.3.1. Поверхнева модифікація	229
5.3.1.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c »	229
5.3.1.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний).....	233
5.3.1.3. Критичні деформації модифікованої деревини.....	235
5.3.1.4. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c » модифікованої деревини	238

5.3.2. Глибинна модифікація полімерною композицією «силор»	240
5.3.2.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c ».....	240
5.3.2.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) глибинно модифікованої деревини	243
5.3.2.3. Критичні деформації.....	245
5.3.2.4. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c ».....	248
5.3.3. Поліпшення міцнісних та деформівних властивостей композиційних матеріалів на основі суцільної деревини та полімерної композиції «силор»	250
5.4. Висновки до п'ятого розділу	254
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	256
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	259
ДОДАТОК А	285
ДОДАТОК Б	295
ДОДАТОК В	301
ДОДАТОК Г.....	305

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ

- $u_{c,d}$ – відносні деформації стиску уздовж волокон;
- $u_{t,d}$ – відносні деформації розтягу уздовж волокон;
- $u_{c,0,d}$ – відносні критичні деформації стиску уздовж волокон;
- $u_{c,el}$ – пружна складова критичних деформацій;
- $u_{c,pl}$ – пластична складова критичних деформацій;
- $u_{c,u}$ – граничні відносні деформації стиску уздовж волокон;
- $u_{t,0,d}$ – критичні деформації розтягу уздовж волокон;
- u_{cl} – відносні деформації стиску уздовж волокон на кінець I ділянки;
- $u_{c,fin}$ – остаточні відносні деформації стиску уздовж волокон;
- $f_{c,0,d}$ – міцність (максимальні напруження) стиску уздовж волокон;
- σ_{cl} – напруження на кінець I ділянки;
- $\sigma_{c,u}$ – напруження, що відповідають граничним відносним деформаціям $u_{c,u}$;
- $\sigma_{c,fin}$ – залишкові напруження на кінець IV ділянки;
- E_0 – початковий модуль пружності;
- E' – модуль деформацій (січний);
- c_1 – коефіцієнт, що залежить від вологості і віку суцільної деревини, модифікатора, якщо деревина модифікована, і способу модифікації;
- W_1, W_2, W_3, W_4 – коефіцієнти поліному 4-го степеня;

$\sigma_{c,d}$ – нормальне напруження стиску уздовж волокон;

$\sigma_{t,d}$ – нормальне напруження розтягу уздовж волокон;

h – висота перерізу;

b – ширина перерізу;

$\frac{1}{r_n}$ – кривина елемента;

η – рівень напружень;

ПМД – поверхнево модифікована деревина;

ГМД – глибинно модифікована деревина.

ВСТУП

Деревина є і буде залишатися ще багато років одним з найпоширеніших сировинних матеріалів різних галузей вітчизняної та світової економік. Матеріали на основі деревини використовуються в деревообробній, меблевій, гірничо-видобувній, хімічній, молочній, будівельній, річковій та морській галузях, паливно-енергетичному комплексі, машинобудуванні, судно- та авіабудуванні, мостових конструкціях та багато інших. У багатьох випадках вона може експлуатуватися в середовищах з підвищеною вологістю, тобто з вологістю більшою за 12%. Величезна кількість наукових праць, які ми знаходимо у вітчизняній та закордонній літературі, стосується роботи деревини за стандартної вологості.

Також в оприлюднених джерелах знаходимо дуже мало інформації, що стосується віку деревини, тобто його впливу на основні міцнісні та деформівні властивості.

В той же час з кожним роком споживання деревини у світовій економіці постійно збільшується, якісних порід стає дедалі менше. Тому доцільно, окрім суцільної та клеєної, використовувати модифіковану деревину, яка має набагато більший потенціал та покращені механічні показники.

Застосування нових хімічних засобів та способів модифікації додають ширші можливості конструкціям, елементам та матеріалам на основі деревини конкурувати у практичному застосуванні з аналогами на основі бетону та металу. З іншої сторони необхідно більш детально досліджувати фізико-механічні показники суцільної, клеєної, модифікованої деревини листяних та хвойних порід.

Донедавна більшість експериментально-теоретичних досліджень відбувалося за м'якого режиму випробувань на зразках чистої деревини перерізом 20x20x30 мм, що не давало змоги в повній мірі встановити дійсний напружено-деформований стан матеріалу, побудувати повну діаграму деформування осьовим стиском уздовж волокон за короткочасного навантаження. А також визначити дійсні значення параметрів міцності та деформівності, зокрема критичні та граничні деформації, модуль пружності та модуль деформацій. Для того щоб встановити такі показники матеріалів, необхідно про-

водити експериментальні дослідження на сучасних випробувальних машинах за жорсткого режиму прикладання навантаження.

Такими дослідженнями частково займалися Тутурин С.В., Вареник К.А. на зразках конструкційних розмірів деревини сосни, Da Silva A., Kyrakides S. – деревини бальзи, Zhou A., Bian Y., Shen Y., Huang D., Zhou M. – композиційних матеріалів на основі деревини бамбука. В цілому практично відсутні експериментально-теоретичні дослідження інших не менш важливих порід суцільної деревини – берези, вільхи, ясена, модрина, ялини, а також клесної та модифікованої деревини, за жорсткого режиму випробувань короткочасним одновісним уздовж волокон навантаженням. Також в світовій практиці практично відсутні дослідження щодо впливу вологості, віку, а також впливу просочення різними універсальними полімерними композиціями на повні діаграми деформування матеріалу та її основні характеристики – критичні та граничні відносні деформації, початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) з урахуванням пружно-пластичності матеріалу.

Одним з найважливіших завдань постає питання розроблення алгоритму поліпшення міцнісних та деформівних властивостей та науково-технічних основ системного поліпшення міцнісних і деформівних властивостей суцільної деревини (листяних та хвойних порід) та композиційних матеріалів на її основі від зрубу деревини до процесу сушіння, склеювання та модифікації (рис.).



Рис. Алгоритм поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини різних порід та композиційних матеріалів на її основі

Також не менш важливим фактором є розробка класичної моделі дійсної роботи суцільної та модифікованої деревини осьовим стиском вздовж волокон.