

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

УДК 539.3

ГОМОН СВЯТОСЛАВ СВЯТОСЛАВОВИЧ

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПОЛІПШЕННЯ МІЦНІСНИХ ТА ДЕФОРМІВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
СУЦІЛЬНОЇ ДЕРЕВИНИ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇЇ
ОСНОВІ**

01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла

технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання чужих ідей, результатів і текстів мають відповідне джерело_____

Науковий консультант:
Ясній Петро Володимирович,
доктор технічних наук,
професор, член-кореспондент
НАН України

Тернопіль 2021

АНОТАЦІЯ

Гомон С.С. Поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі.
Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла (технічні науки).
– Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 2021.

Дисертація присвячена розробленню алгоритму та науково-технічних основ системного поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини листяних та хвойних порід (від зрубу до процесу сушіння, клеєння й модифікації) та композиційних матеріалів на її основі з прогнозованими характеристиками для проектування, ремонту, реконструкції, утримання та виготовлення конструкційних деталей, матеріалів, виробів, елементів, конструкцій, які застосовуються в різних галузях народного господарства (будівельній, деревообробній, гірничо-видобувній, річковій та морській, паливно-енергетичному комплексі, машинобудуванні, суднобудуванні, мостових конструкціях та багато інших).

У **вступі** зазначена актуальність, поставлені мета та завдання досліджень, наведена загальна характеристика дисертації, викладені наукова новизна, основний внесок здобувача, практична значимість та апробація роботи.

Перший розділ присвячений огляду етапів та сучасного стану експериментально-теоретичних досліджень та існуючих методів випробування суцільної, клеєної та модифікованої деревини. Встановлено основні чинники, що впливають на міцнісні та деформівні властивості деревини різних порід. Проведено детальний аналіз сучасного випробувального обладнання. Наведено основні напрямки наукових досліджень та яким чином вони будуть реалізовуватись.

У **другому розділі** описується методика та устаткування, що використовувалося при проведенні експериментальних досліджень основних

міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі одноразовим осьовим стискаючим повздовжнім короткочасним навантаженням. Вибрано матеріали і вказуються параметри при виготовленні основних (призми з суцільної, клеєної та модифікованої деревини) та допоміжних (для визначення міцності клейових з'єднань) дослідних зразків. Вибрано полімерну композицію «силор» для поверхневої та глибинної модифікації призм з суцільної та клеєної деревини. Описано способи модифікації зразків з суцільної та клеєної деревини. Для аналітичного опису діаграм деформування суцільної деревини та композитів на її основі на всіх стадіях роботи запропоновано поліном 4-го степеня, який дає хорошу збіжність експериментальних та теоретичних значень, як на висхідній, так і на спадній ділянках дійсної (повної) та оптимізованої (з обмеженням в точці граничних деформацій) діаграм. Запропоновано робочі гіпотези та передумови моделювання напружено-деформованого стану нормального перерізу елементів з суцільної та модифікованої деревини. Вперше запропоновано формулу для визначення критичних деформацій досліджуваних матеріалів, яка включає пружну та пластичну складові, а також розроблено розрахунковий апарат з визначення граничних відносних деформацій на основі діаграми «момент-кривина» згинального елемента прямокутного перерізу.

Третій розділ присвячено опису отриманих результатів експериментально-теоретичних досліджень діаграм механічного стану 60-ти річної деревини хвойних та листяних порід та впливу вологості на міцнісні та деформівні властивості за дії осьового стиску вздовж волокон одноразовим короткочасним навантаженням. Визначено основні ділянки та параметри механічного стану деревини за стиску, а також критичні і граничні відносні деформації за вологості 12%, 21% та 30%. Запропоновано узагальнений аналітичний опис механічного стану суцільної деревини різних порід та вологості за одноразового короткочасного повздовжнього деформування в жорсткому режимі роботи від початку роботи призм і до руйнування. Встановлено взаємозв'язок вологості з основними міцнісними та деформівними

параметрами діаграми «напруження σ_c – деформації u_c ». Визначено основні напрямки поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини листяних та хвойних порід внаслідок її сушіння.

Встановлено, що процес сушіння деревини (від 30 до 12%) сприяє поліпшенню основних міцнісних та деформівних властивостей, зокрема збільшує міцність в 1,85–2,33 рази, початковий модуль пружності в 1,18–1,61 рази та зменшує деформівність (критичні деформації в 1,16–1,22 рази та граничні в 1,09–1,30 рази).

У четвертому розділі було висвітлено питання експериментально-теоретичних досліджень впливу віку на діаграми механічного стану та міцнісні, а також деформівні властивості деревини хвойних та листяних порід за одноразових навантажень осьовому стиску вздовж волокон за жорсткого режиму роботи призм. Визначено взаємозв'язок віку деревини з основними міцнісними та деформівними параметрами повної діаграми деформування. Встановлено, що основні міцнісні та деформівні параметри діаграми деформування незначно зменшуються від 60 до 40 років та суттєво від 40 до 20 років: міцність деревини в інтервалі від 60 до 20 років на 27–45%; початковий модуль пружності на 12–17%; критичні відносні деформації листяних та хвойних порід на 19–49%; граничні деформації на 8–39%.

П'ятий розділ присвячено дослідженню суцільної та клеєної деревини різних порід, які були модифіковані полімерною композицією «силор» за природного поверхневого та вимушеного глибинного просочення. А також звичайної клеєної деревини.

Встановлено, що межа міцності зразків з клеєної деревини хвойних та листяних порід збільшується на 13–25% в порівнянні з суцільною деревиною вологістю 12% віком 60 років, а деформівність в ту чи іншу сторону несуттєво зростає або падає. Початкові модулі пружності всіх досліджуваних порід клеєної деревини збільшилися в межах від 13 % до 31% .

Виявлено, що за поверхневої модифікації клеєної деревини міцність збільшується на 19% в порівнянні зі зразками простої клеєної; початкові модулі

пружності збільшуються на 21%; відносні деформації новоутворених композиційних матеріалів зменшуються: вздовж волокон на 22%; поперечні перпендикулярні до клеєвого шва на 27%; поперечні паралельні клеєвому шву на 45%.

Встановлено, що за поверхневої модифікації суцільної деревини листяних та хвойних порід максимальні напруження збільшуються на 12–22% в порівнянні із суцільною деревиною вологістю 12% віком 60 років. Деформівність зменшується в межах 14–35%. В той же час складові критичних деформацій змінюються по різному: пружна – зменшується, а пластична – залишається на тих же позначках з незначними відхиленнями в ту чи іншу сторону. Початковий модуль пружності досліджуваних зразків є більшим на 23–55%.

Виявлено, що міцність глибинно модифікованих матеріалів полімерною композицією «силор» збільшується в межах 17%–21%, деформівність (критичні відносні деформації) при цьому стають меншими на 7–20%, а початковий модуль пружності суттєво зростає на 26–35% в порівнянні з деревиною тих же порід модифікованих поверхнево.

В шостому розділі описано область застосування дійсних (повних) та оптимізованих (з обмеженням в точці граничних деформацій) діаграм «напруження – деформації». Використовуючи такі діаграми, удосконалено математичний апарат розрахунку різних елементів та конструкцій на основі суцільної, клеєної та модифікованої деревини.

Ключові слова: деревина, діаграми механічного стану, критичні деформації, граничні деформації, міцність, деформівність, модуль пружності, полімерна композиція «силор», композиційний матеріал.

SUMMARY

Gomon S.S. Improvement of strength and deformable properties of solid wood and composite materials based on it. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 01.02.04 - mechanics of a deformable firm body (technical sciences). Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2021.

The dissertation is devoted to the development of algorithm and also scientific and technical bases of system improvement of strength and deformable properties of solid wood (deciduous and coniferous species) and composite materials based on it with predicted characteristics for design, repair, reconstruction, maintenance and manufacture of structural parts, materials, products, elements, structures used in various sectors of the economy (construction, woodworking, mining, river and sea, fuel and energy complex, mechanical engineering, shipbuilding, bridge structures and many others).

In the **introduction** the urgency is specified, the purpose and tasks of researches are set, the general characteristic of the dissertation is resulted, the scientific novelty, the basic contribution of the applicant, practical value and approbation of work is stated.

The first section is devoted to an overview of the stages and current state of experimental and theoretical research and existing methods of testing solid, glued and modified wood. The main factors influencing the strength and deformable properties of wood of different breeds are established. A detailed analysis of modern test equipment was performed. The main directions of scientific research and how they will be implemented are given.

The second section describes the method and equipment used in conducting experimental studies of the main strength and deformable properties of solid wood and composite materials based on it with a single axial compressive longitudinal short-term load. Selected materials and parameters are specified in the manufacture of basic (prisms of solid, glued and modified wood) and auxiliary (to determine the

strength of adhesive joints) prototypes. The polymer composition "silor" was chosen for surface and deep modification of prisms from solid and glued wood. Methods of modification of samples from solid and glued wood are described. It is offered for the analytical description of diagrams of deformation of continuous wood and its composites on the basis at all stages of work by the polynomial of the 4th degree which gives good convergence of experimental and theoretical values, both on ascending, and on descending sites of real (full) and optimized (with restriction at the point of ultimate deformations) diagrams. Working hypotheses and prerequisites for modeling the stress-strain state of the normal cross section of solid and modified wood elements are proposed. For the first time, a formula for determining the critical deformations of the investigated materials, which includes elastic and plastic components was proposed, and developed a calculation apparatus for determining the ultimate relative deformations based on the diagram "moment-curvature" of the bending element of rectangular cross section.

The third section is devoted to the description of the obtained results of experimental-theoretical researches of diagrams of mechanical condition of 60-year-old coniferous and deciduous wood and influence of moisture on strength and deformable properties under axial compression along fibers by one-time short-term loading. The main areas and parameters of the mechanical state of wood under compression, as well as critical and ultimate relative deformations at a humidity of 12%, 21% and 30% are determined. A generalized analytical description of the mechanical state of solid wood of different breeds and humidity under a single short-term longitudinal deformation in the rigid mode of operation from the beginning of work of prisms to the destruction is proposed. The interconnection between humidity and the main strength and deformable parameters of the diagram "stress σ_c - deformation u_c " is established. The main directions of improvement of strength and deformable properties of solid wood of deciduous and coniferous species as a result of its drying are determined.

It is established that the process of drying wood (from 30 to 12%) improves its basic strength and deformable properties, in particular increases the strength by 1.85

– 2.33 times, the initial modulus of elasticity by 1.18–1.61 times and reduces the deformability (critical deformations in 1.16–1.22 times and limit deformations in 1.09–1.30 times).

The fourth section covers the issues of experimental-theoretical studies of the influence of age on the diagrams of mechanical state and strength, as well as deformable properties of deciduous and coniferous species under single loads of axial compression along the fibers of working prisms in the rigid mode. The interconnection between the age of wood and the main strength and deformability parameters of the complete deformation diagram is determined

It is established that the main strength and deformability parameters of the deformation diagram slightly decrease from 60 to 40 years and significantly from 40 to 20 years: the strength of wood in the range from 60 to 20 years by 27–45%; initial modulus of elasticity by 12–17%; critical relative deformations of deciduous and coniferous species by 19–49%; limit deformations by 8–39%.

The fifth section is devoted to the study of solid and glued wood of different species, which were modified with a polymer composition "silor" under natural surface and forced deep impregnation. It is established that the tensile strength of samples of glued wood of coniferous and deciduous species increases by 13-25%, and the deformability in one direction or another insignificantly increases or decreases. The initial modulus of elasticity of all studied species of glued wood increased from 13% to 31%.

It was found that the surface modification of plywood increases the strength by 19% compared to samples of plain plywood; initial modulus of elasticity increases by 21%; relative deformations of newly formed composite materials are reduced: along the fibers by 22%; transverse perpendicular to the adhesive seam by 27%; transverse parallel to the adhesive seam by 45%.

It is established that at surface modification of solid wood of deciduous and coniferous breeds the maximum stresses increase by 12–22% in comparison with solid wood with humidity of 12% at the age of 60 years. Deformability decreases in the range of 14–35%. At the same time, the components of critical deformations

change in different ways: elastic - decreases, and plastic - remains at the same marks with slight deviations in one direction or another. The initial modulus of elasticity of the studied samples is greater by 23–55%.

It was found that the strength of deeply modified materials by the polymer composition "Silor" increases in the range of 17–21%, deformability (critical relative deformation) is reduced by 7–20%, and the initial modulus of elasticity increases significantly by 26–35% compared with wood of the same breeds modified superficially.

The sixth section describes the scope of valid (complete) and optimized (with a limit at the point of boundary deformation) diagrams of "stress - strain". Using such diagrams, the mathematical apparatus of calculation of various elements and constructions on the basis of continuous, glued and modified wood is improved.

Keywords: wood, diagrams of mechanical state, critical deformations, ultimate deformations, strength, deformability, modulus of elasticity, polymer composition «silor», composite material.

Список наукових публікацій за темою дисертації

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав та фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз

1. Yasniy P., Gomon S. Timber with improved strength and deformable properties. *Scientific Journal of Ternopil National Technical University*. Ternopil: TNTU, 2020. Vol 99. No3. P. 17–27. (Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, способи поверхневої та глибинної модифікації суцільної деревини, опрацювання результатів, висновки). (Index Copernicus).

2. Гомон С.С. Математическая модель определения предельных деформаций лиственных и хвойных пород. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. Budapest, 2020. Ser. VIII(29), Issue: 238. Pp. 46–50. (Index Copernicus).

3. Gomon S., Gomon S., Karavan V., Gomon P., Sobczak-Piastka J. Investigation of solid and glued wood on the effect of variables of low-cycle repeated loads. *AIP Conference Proceedings 2077*, 020020 (2019). (Особистий внесок: виконано опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки). (Scopus, Web of Science).

4. Гомон С.С. Визначення критичних деформацій різних порід деревини вирощених на території України та за її межами. *Sciences of Europe*. Praha, 2020. No 54. Vol.1.Pp. 36–41.

5. Gomon S., Gomon S., Gomon P., Shkirenko S. The Basis of the Deformation Method for Calculating of Elements from Wood under Cross-Section Bending. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol.7 (4.8). P. 109–114. (Особистий внесок: запропоновано основні гіпотези розрахунку, висновки).

6. Yasniy P., Gomon S., Gomon P. On approximation of mechanical condition diagrams of coniferous and deciduous wood species on compression along the fibers. *Scientific Journal of Ternopil National Technical University*. Ternopil: TNTU, 2020. Vol 97. No 1. P. 57–64. (Особистий внесок: запропоновано теоретичні основи

та апроксимацію діаграм механічного стану суцільної, клеєної та модифікованої деревини на основі полінома 4-го степеня). (Index Copernicus).

7. Sobczak-Piastka J., Gomon S.S., Polishchuk M., Homon S., Gomon P., Karavan V. Deformability of Glued Laminated Beams with Combined Reinforcement. *Buildings* 2020, 10, 92. (Особистий внесок: виконано опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки). (Scopus, Web of Science).

8. Ясній П.В., Гомон С.С. Дослідження січних модулів листяних та хвойних порід деревини з різним показником вологості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця: ВНТУ, 2020. Вип. 4 (151). С. 125–130. (Особистий внесок: виконано розроблення методики з визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій (січного) суцільної деревини різної вологості з урахуванням пружно-пластичних властивостей матеріалу). (Index Copernicus).

9. Гомон С.С., Гомон П.С., Гомон С.Ст. Універсальний метод визначення напружень в стиснутій зоні дерев'яних балок прямокутної форми на основі їх деформування. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. Budapest, 2020 Feb. VIII(27). Issue: 224. P. 10–12. (Особистий внесок: виконано розроблення загальної методології розрахунку елементів та конструкцій на основі деревини з врахуванням дійсних (повних) та оптимізованих діаграм деформування матеріалу). (Index Copernicus).

Публікації у наукових періодичних фахових виданнях України

10. Гомон С.С. Аналіз залежностей для побудови повних діаграм механічного стану деревини « σ - u ». *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2019. Вип. 37. С. 136–142.

11. Ясній П.В., Гомон С.С. Експериментальні дослідження суцільної деревини конструкційних розмірів з врахуванням фактора вологості. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Вінниця: ВНТУ, 2020. Том 28. №1. С. 41–48. (Особистий внесок: виконано розроблення методики та

проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки).

12. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Зінчук А.В. Дослідження модифікованої силором клеєної деревини на стиск вздовж волокон. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вісті Донецького гірничого інституту»*. Покровськ: ДВНЗ «Донецький НТУ», 2017. №1. С. 134–138. *(Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, способи поверхневої та глибинної модифікації клеєної деревини, опрацювання результатів, висновки).*

13. Gomon S.S., Savchuck V.O., Melnyk Yu.A., Vereshko O.V. Modern testing machines for investigation of wood and timber-based composite materials. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, 2020. Вип.14. С. 73–80. *(Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень на сучасному випробувальному обладнанні; висновки).*

14. Гомон С.С., Гомон П.С. Побудова дійсних діаграм механічного стану деревини « σ - ϵ » суцільного перерізу ялини та берези за жорсткого режиму випробувань. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2020. Вип. 38. С. 321–330. *(Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки).*

15. Гомон С.С. Методика експериментальних досліджень модифікованої силором деревини з стимуляцією просочення ультразвуком за роботи на стиск вздовж волокон. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2018. Вип. 36. С. 81–86.

16. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Діаграми механічного стану деревини сосни за одноразового короткочасного деформування до повної втрати міцності матеріалу. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2012. Вип 23. С. 166–171. *(Особистий внесок:*

виконано опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки).

17. Gomon S.S. Fluence of age factor on main strength and deformative properties of timber. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, 2020. Вип.13. С. 35–41.

18. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А., Яцук В.О. Визначення напружено-деформованого стану нормального перерізу за роботи деревини на поперечний згин з урахуванням повної діаграми деформування матеріалу. *Проблеми розвитку міського середовища*. Науково-технічний зб. Київ: НАУ, 2012. Вип.8. С. 66–72. *(Особистий внесок: запропоновано основні гіпотези розрахунку, висновки).*

19. Gomon S.S., Pilipaka L.M. Experimental studies of the glued wood strength and deformation properties under the hard test mode. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ, 2020. Том 31 (70). № 3. Ч.2. С. 130–135. *(Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки).*

20. Гомон С.Ст., Гомон С.С. Напружено-деформований стан нормальних перерізів за роботи деревини на поперечний згин з урахуванням повної діаграми деформування матеріалу. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2011. Вип. 22. С. 265–271. *(Особистий внесок: запропоновано основні гіпотези розрахунку, висновки).*

21. Гомон С.С., Савчук В.О., Мельник Ю.О., Верешко О.В. Область застосування та способи модифікації композиційних матеріалів на основі деревини. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк: ЛНТУ, 2019. Вип. 12. С. 44–50. *(Особистий внесок: виконано аналіз способів поверхневої та глибокої модифікації суцільної та клеєної деревини, область застосування таких композиційних матеріалів, висновки).*

22. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Діаграми механічного стану деревини сосни за повторного деформування до повної втрати міцності

матеріалу. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2012. Вип 24. С. 106–112. (Особистий внесок: виконано опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки).

23. Гомон С., Гомон П., Караван В. Експериментальні дослідження хвойних та листяних порід деревини одноразовим короткочасним навантаженням на стиск уздовж волокон за жорсткого режиму випробувань. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура та сільськогосподарське будівництво*. Львів: ЛНАУ, 2020. №21. С. 34–40. (Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки).

24. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Прогнозування залишкового часу працездатності конструкцій з деревини за повторних навантажень. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2015. Вип. 31. С. 417–421. (Особистий внесок: запропоновано основні гіпотези розрахунку, висновки).

25. Gomon S.S., Pilipaka L.M. Universal method for determining the modules of deformation of solid wood and composite materials based on it. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки»*. Рівне: НУВГП, 2020. Випуск 2(90). С. 168–178. (Особистий внесок: виконано розроблення методики з визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій (січного) суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі з урахуванням пружно-пластичних властивостей матеріалу).

26. Гомон С.Ст., Гомон С.С. Особливості роботи будівельних конструкцій з деревини при дії повторних навантажень за критерієм деформаційного руйнування. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2014. Вип. 28. С. 152–157. (Особистий внесок: запропоновано основні гіпотези розрахунку, висновки).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

27. Гомон С.С. Перспективи використання модифікованої деревини в Україні для об'єктів сільського господарства. *Актуальні задачі сучасних технологій*: збірник тез доповідей VI міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, м. Тернопіль, 16–17 листопада 2017 р. Том 1. Тернопіль: ТНТУ, 2017. С. 72.

28. Gomon S., Gomon S., Polishchuk M. Experimental and statistical investigation of the secant modulus of elasticity of glued timber modified with polimer “Silor”. Proceedings of the 1st Eastern Europe Conference on Timber Constructions. Kharkiv – “Madrid” Typography, 2018. P. 137–142. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики з визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій (січного) суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі з врахуванням пружно-пластичних властивостей матеріалу*).

29. Гомон С.С. Методика досліджень основних механічних та деформативних властивостей суцільної та клеєної деревини. *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування*: матеріали міжнародної конференції, м. Тернопіль, 24–27 вересня. 2019 р. Тернопіль:ТНТУ, 2019. С. 198–200.

30. Гомон С.С., Дмитрук В.П., Мельник Ю. А., Верешко О.В. Аналіз поверхневих та глибинних способів модифікації деревини. *Сучасні проблеми містобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: збірник тез доповідей всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів, м. Луцьк, 15 листопада 2019 р. Луцьк: ЛНТУ, 2019. С.74–75. (*Особистий внесок: виконано аналіз способів поверхневої та глибинної модифікації суцільної та клеєної деревини, область застосування таких композиційних матеріалів, висновки*).

31. Гомон С.С., Савчук В.О. До визначення оптимального часу просочення полімерної композиції «СИЛОР» в тіло деревини. *Актуальні задачі сучасних технологій*: збірник тез доповідей VIII міжнародної науково-технічної

конференції молодих учених та студентів, м. Тернопіль, 27–28 листопада 2019 р. Том 1. Тернопіль: ТНТУ, 2019. С. 70. *(Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, способи поверхневої та глибинної модифікації суцільної та клеєної деревини, опрацювання результатів, висновки).*

32. Гомон С.С., Сальчук В.Л., Савчук В.О., Верешко О.В. Експериментальні дослідження деревини за жорсткого режиму випробувань за стандартної вологості. *Проблеми інтегрованого розвитку міст*: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції учених та студентів, м. Луцьк, 29–31 січня 2020 р. Луцьк: ЛНТУ, 2020. С. 18–20. *(Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки).*

33. Ясній П.В., Гомон С.С., Дмитрук В.П. Міцність та деформівність деревини модрини з різним показником вологості за жорсткого режиму випробувань. *SCIENCE, SOCIETY, EDUCATION: TOPICAL ISSUES AND DEVELOPMENT PROSPECTS*. Abstracts of VI International Scientific and Practical Conference, Kharkiv, 10–12 May 2020. P. 319–322. *(Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки).*

34. Гомон С.С., Гомон П.С. Теоретичні основи для побудови повних діаграм деформування деревини. Інновації у будівництві: збірник тез доповідей V міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів, м. Луцьк, 14 травня 2020 року. Луцьк: ЛНТУ, 2020. С. 5–7. *(Особистий внесок: запропоновано теоретичні основи та апроксимацію діаграм механічного стану суцільної, клеєної та модифікованої деревини на основі полінома 4-го степеня).*

35. Ясній П.В., Гомон С.С., Дмитрук В.П. Особливості побудови повних діаграм деформування деревини ясена за жорсткого режиму навантажень. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції до 60 річчя з дня заснування

Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175 річчя з дня народження Івана Пулюя, м. Тернопіль, 14–15 травня 2020 р. Тернопіль:ТНТУ, 2020. С. 51. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки*).

36. Гомон С.С., Сальчук В.Л., Верешко О.В. Прочностные и деформативные свойства увлажненной древесины. *Eurasian scientific congress. Abstracts of the 8th International scientific and practical conference*. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2020. Pp. 136–139. URL: <https://sci-conf.com.ua/viii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-eurasian-scientific-congress-9-11-avgusta-2020-goda-barselona-ispaniya-arhiv/>. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки*).

37. Гомон С.С., Савчук В.О., Мельник Ю. А., Верешко О.В. Апроксимація діаграм механічного стану деревини з підвищеним вмістом вологи. *Іноваційні процеси в галузі дорожнього будівництва: матеріали IV всеукраїнської науково-практичної інтернет- конференції молодих учених та студентів*, м. Луцьк, 30 жовтня 2020 р. Луцьк: ЛНТУ, 2020.

URL: <https://sites.google.com/lntu.edu.ua/konf2020ada/tezi>. (*Особистий внесок: запропоновано теоретичні основи та апроксимацію діаграм механічного стану суцільної деревини на основі полінома 4-го степеня*).

38. Гомон С.С. Дослідження критичних деформацій різних порід деревини експериментальним шляхом: збірник тез доповідей V міжнародної науково-технічної конференції «Ефективні технології в будівництві» та VII міжнародної науково-технічної конференції «Нові технології в будівництві», м. Київ, 19 листопада 2020 р. Київ: КНУБА, 2020. С. 138–139.

39. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Построение полной диаграммы деформирования древесины сосны при действии статической загрузки. Сборник научных трудов “*Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии*”. ГУ ВПО «Белорусско-Российский

університет». Могилев, 2012. Часть 2. С. 81–82. (*Особистий внесок: виконано опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки*).

В інших виданнях

40. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Зінчук А.В. Деформативність модифікованої силором клеєної деревини за роботи на стиск вздовж волокон. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2017. Вип. 34. С. 110–117. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень модифікованої деревини, запропоновано способи поверхневої та глибинної модифікацій, опрацювання результатів, висновки*).

41. Гомон С.С., Гомон П.С., Верешко О.В. До визначення критичних деформацій хвойних та листяних порід деревини. *Містобудування та територіальне планування*. Київ: КНУБА, 2020. Вип. 73. С.78–87. (*Особистий внесок: запропоновано функцію з визначення критичних деформацій суцільної деревини хвойних і листяних порід і композиційних матеріалів на її основі*).

42. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Гомон П.С., Верешко О.В. До визначення січного модуля деформацій клеєної деревини модифікованої «СИЛОРОМ». *Містобудування та територіальне планування*. Київ: КНУБА, 2020. Вип. 74. С. 92–101. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики з визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій (січного) суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі з урахуванням пружно-пластичних властивостей матеріалу*).

43. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Дослідження міцності та деформативності деревини сосни за повторного деформування до досягнення повної втрати міцності матеріалу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк: ЛНТУ, 2014. Вип. 1. С. 40–46. (*Особистий внесок: виконано опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки*).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ.....	26
ВСТУП.....	27
РОЗДІЛ 1. СТАН ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОТИ СУЦІЛЬНОЇ ДЕРЕВИНИ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇЇ ОСНОВІ.....	36
1.1. Будова суцільної деревини.....	36
1.2. Основні дефекти та пошкодження деревини.....	39
1.3. Чинники, що впливають на міцнісні та деформівні властивості деревини.....	41
1.4. Сучасне випробувальне обладнання.....	47
1.5. Експериментальні дослідження діаграм “напруження σ_c - деформацій u_c » за м’якого та жорсткого режиму випробувань.....	51
1.6. Критичні деформації суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі.....	60
1.7. Граничні деформації суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі.....	63
1.8. Модулі пружності деревини та композиційних матеріалів на її основі.....	64
1.9. Клеєна деревина.....	68
1.9.1. Міцність суцільних клеєних з’єднань.....	69
1.9.2. Експериментальні дослідження клеєної деревини на стиск вздовж волокон.....	70
1.10. Модифікована деревина.....	73
1.10.1. Способи модифікації деревини.....	73
1.10.2. Експериментальні дослідження модифікованої деревини.....	74
1.10.3. Речовини для модифікації деревини.....	78
1.11. Аналіз залежностей для побудови повних діаграм механічного стану деревини « σ_c - u_c ».....	79
1.12. Висновки до першого розділу.....	83
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТА ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	85

2.1. Вибір розмірів зразків	85
2.2. Вибір деревини для випробувань	86
2.3. Виготовлення дослідних зразків	89
2.4. Силове обладнання для проведення експерименту	89
2.5. Програма та об'єм експериментальних досліджень	92
2.5.1. Перша серія випробувань. Дослідження суцільної деревини	93
2.5.2. Друга серія випробувань. Дослідження клеєної деревини.....	98
2.5.3. Третя серія випробувань. Дослідження клеєної та клеєної модифікованої деревини	100
2.5.4. Четверта серія випробувань. Дослідження модифікованої суцільної деревини.....	102
2.6. Полімерна композиція «силор».....	104
2.7. Методика експериментальних досліджень за жорсткого та м'якого режиму прикладення навантажень.....	106
2.7.1. Експериментальні дослідження за жорсткого режиму прикладення навантажень.....	106
2.7.2. Експериментальні дослідження за м'якого режиму прикладення навантажень.....	108
2.8. Повна діаграма деформування суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі осьовим стиском вздовж волокон	108
2.9. Апроксимація діаграм деформування «напруження-деформації» деревини та композиційних матеріалів на її основі	110
2.10. Критичні деформації суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі	117
2.11. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі.....	121
2.12. Граничні деформації суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі	125
2.13. Висновки до другого розділу	128
РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА ДІЙСНИХ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ ХВОЙНИХ ТА ЛИСТЯНИХ ПОРІД СУЦІЛЬНОЇ ДЕРЕВИНИ КОНСТРУКЦІЙНИХ	

РОЗМІРІВ « σ_c-u_c » З ВРАХУВАННЯМ ФАКТОРА ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ.....	132
3.1. Аналіз дійсної (повної) діаграми деформування деревини « σ_c-u_c » короткочасного одноразового стиску уздовж волокон за жорсткого режиму випробувань	132
3.2. Вплив вологості на міцнісні та деформівні властивості суцільної деревини хвойних та листяних порід за повздовжнього стиску (І серія випробувань).....	135
3.2.1. Дослідження суцільної деревини вологістю 30 %	136
3.2.1.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження-деформації» за повздовжнього одноразового стиску.....	136
3.2.1.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) за повздовжнього одноразового стиску	139
3.2.1.3. Критичні деформації суцільної деревини за повздовжнього одноразового стиску	141
3.2.1.4. Граничні відносні деформації суцільної деревини за повздовжнього одноразового короткочасного стиску.....	144
3.2.1.5. Апроксимація діаграм механічного стану деревини за одноразового повздовжнього стиску	147
3.2.2. Дослідження суцільної деревини вологістю 21%	152
3.2.2.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c » за повздовжнього одноразового стиску.....	152
3.2.2.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) за стиску вздовж волокон.....	155
3.2.2.3. Критичні деформації суцільної деревини за вологості 21%.....	157
3.2.2.4. Граничні відносні деформації суцільної деревини за повздовжнього стиску за вологості 21%.....	160
3.2.2.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження-деформації» за стиску вздовж волокон.....	163

3.2.3. Дослідження суцільної деревини хвойних та листяних порід вологістю 12% віком 60 років.....	167
3.2.3.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c ».....	167
3.2.3.2. Визначення початкового модуля пружності деревини та модуля деформацій (січного)	171
3.2.3.3. Критичні відносні деформації суцільної деревини за стандартної вологості 12% віком 60 років.....	172
3.2.3.4. Граничні деформації за стандартної вологості 12% віком 60 років.....	173
3.2.3.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження-деформації» за стандартної вологості 12% віком 60 років	177
3.3. Взаємозв'язок вологості з основними міцнісними та деформівними параметрами діаграми «напруження σ_c – деформації u_c ».....	180
3.4. Поліпшення основних міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини листяних та хвойних порід внаслідок її сушіння.....	185
3.5. Висновки до третього розділу.....	191
РОЗДІЛ 4. ПОБУДОВА ДІЙСНИХ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ ХВОЙНИХ ТА ЛИСТЯНИХ ПОРІД СУЦІЛЬНОЇ ДЕРЕВИНИ КОНСТРУКЦІЙНИХ РОЗМІРІВ «σ_c-u_c» ІЗ ВРАХУВАННЯМ ФАКТОРА ВІКУ	
.....	193
4.1. Вплив віку на міцнісні та деформівні властивості суцільної деревини (I серія випробувань).....	193
4.1.1. Визначення основних міцнісних та деформівних властивостей деревини віком 40 років.....	193
4.1.1.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c ».....	194
4.1.1.2. Початковий модуль пружності деревини та модуль деформацій (січний) деревини у віці 40 років.....	196
4.1.1.3. Критичні відносні деформації суцільної деревини у віці 40 років.....	198
4.1.1.4. Граничні деформації суцільної деревини у віці 40 років.....	200

4.1.1.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c » у віці 40 років.....	203
4.1.2. Визначення основних міцнісних та деформівних властивостей деревини віком 20 років.....	207
4.1.2.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c » віком 20 років.....	207
4.1.2.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) віком 20 років.....	210
4.1.2.3. Критичні деформації деревини віком 20 років.....	212
4.1.2.4. Граничні відносні деформації суцільної деревини за повздовжнього стиску віком 20 років.....	214
4.1.2.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c ».....	217
4.2. Взаємозв'язок фактора віку з основними міцнісними та деформівними параметрами діаграми «напруження σ_c – деформації u_c ».....	221
4.3. Динаміка зміни основних міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини від її віку.....	225
4.4. Висновки до четвертого розділу.....	228
РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ СУЦІЛЬНОЇ ДЕРЕВИНИ..	
5.1. Клеєна деревина (II серія випробувань)	230
5.1.1. Дослідження роботи клейових з'єднань деревини за сколювання вздовж волокон.....	230
5.1.2. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c ».....	232
5.1.3. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний)	236
5.1.4. Критичні деформації.....	238
5.1.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c ».....	241
5.1.6. Поліпшення міцнісних та деформівних властивостей клеєної деревини.....	243

5.2. Клеєна модифікована деревина за м'якого режиму випробувань (III серія випробувань).....	245
5.2.1 Визначення оптимального часу просочення полімерної композиції «силор» в тіло деревини за поверхневої модифікації.....	246
5.2.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний).....	248
5.2.3. Деформівність клеєної деревини модифікованої полімерною композицією «силор»	249
5.3. Суцільна деревина модифікована полімерною композицією «силор» за жорсткого режиму випробувань (IV серія випробувань).....	252
5.3.1. Поверхнева модифікація.....	253
5.3.1.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c »	253
5.3.1.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний).....	257
5.3.1.3. Критичні деформації модифікованої деревини.....	259
5.3.1.4. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c » модифікованої деревини	262
5.3.2. Глибинна модифікація полімерною композицією «силор»	264
5.3.2.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c ».....	264
5.3.2.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) глибинно модифікованої деревини.....	267
5.3.2.3 Критичні деформації.....	269
5.3.2.4. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c ».....	272
5.3.3. Поліпшення міцнісних та деформівних властивостей композиційних матеріалів на основі суцільної деревини та полімерної композиції «силор».....	274
5.4. Висновки до п'ятого розділу	278
РОЗДІЛ 6. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ СУЦІЛЬНОЇ, КЛЕЄНОЇ ТА МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ.....	280
6.1. Напружено-деформований стан та основні рівняння рівноваги дерев'яного елемента.....	280

6.2. Напружено-деформований стан поперечного перерізу дерев'яного елемента, викликаний дією поздовжніх зусиль розтягу в дерев'яному елементі та короткому стиснутому, з використанням оптимізованої діаграми стиску та розтягу	282
6.3. Визначення напружено-деформованого стану поперечного перерізу згинального елемента з використанням оптимізованої діаграми стиску та розтягу.....	284
6.3.1. Окремий випадок визначення напружено-деформованого стану в прямокутному поперечному перерізі згинального дерев'яного елемента.	292
6.3.2. Використання оптимізованих діаграм для визначення прогину згинального дерев'яного елемента з перерізом прямокутної форми	299
6.4. Визначення напружено-деформованого стану в поперечному перерізі стиснуто-зігнутого та розтягнуто-зігнутого дерев'яного елемента.....	301
6.5. Висновки до шостого розділу.....	306
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	307
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	310
ДОДАТОК А.....	345
ДОДАТОК Б.....	357
ДОДАТОК В.....	360
ДОДАТОК Г.....	362
ДОДАТОК Д.....	374
ДОДАТОК Е.....	383
ДОДАТОК Є.....	384

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_{c1} – 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_{c1} – 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

Актуальність теми. Деревина – один з найпоширеніших матеріалів природного походження, який використовують у різних галузях вітчизняної та зарубіжних економік. Зокрема, в будівельній, деревообробній, гірничо-видобувній, річковій та морській галузях, паливно-енергетичному комплексі, машинобудуванні, суднобудуванні, мостових конструкціях та інших. У багатьох випадках під час експлуатації вона зазнає різних впливів агресивних середовищ. До таких відносять середовища з підвищеною вологістю. У незахищеному стані деревина в такому середовищі може мати вологість понад 12%. Більшість оприлюднених наукових праць вітчизняних та зарубіжних учених стосується роботи деревини за стандартної вологості.

Другим фактором, який впливає на міцнісні і деформативні характеристики, є вік деревини. Таких досліджень у літературі також є дуже обмежена кількість.

Третім, також не менш важливим фактором, є вплив швидкості деформування на основні міцнісні та деформівні властивості деревини.

З іншого боку, споживання деревини у світі постійно зростає. Якісної деревини листяних і хвойних порід стає дедалі менше. Без сумніву, суцільна та клеєна деревина є матеріалом, потенціал якого не повною мірою вивчений. Модифікована деревина має ще перспективніші характеристики.

В умовах здорожчання енергозатратних будівельних матеріалів винайдення та використання нових хімічних засобів та способів модифікації дають можливість конструкціям, елементам та матеріалам на основі деревини конкурувати у практичному застосуванні з аналогами на основі бетону та металу. Однак фізико-механічні властивості, як суцільної та клеєної, так і модифікованої деревини листяних та хвойних порід, потребують додаткового дослідження.

Як правило, донині експериментально-теоретичні дослідження проводилися за м'якого режиму випробувань на зразках чистої деревини перерізом 20x20x30 мм, що не давало змоги встановити дійсний напружено-деформований стан матеріалу, побудувати повну діаграму деформування на стиск уздовж волокон за короткочасного навантаження. Як наслідок,

встановити істинні значення параметрів міцності та деформівності, зокрема критичні та граничні деформації, модуль деформацій та інші. Щоб встановити такі характеристики матеріалів, необхідно проводити експериментальні дослідження на сучасних випробувальних машинах за жорсткого режиму прикладання навантаження. Такі дослідження частково проводили 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. Проте відсутні експериментально-теоретичні дослідження інших порід суцільної деревини – берези, вільхи, ясена, модрина, ялини, а також клеєної та модифікованої деревини, за жорсткого режиму випробувань короткочасним одновісним уздовж волокон навантаженням. Крім того, в літературі не знаходимо досліджень щодо впливу вологості, віку, швидкості деформування, а також впливу просочення різними полімерними композиціями на повні діаграми деформування матеріалу і її основні параметри – 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

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В дисертаційній роботі вирішено окремі завдання та проблеми з експериментальних та теоретичних досліджень за держбюджетними науково-дослідними напрямками, які включались в плани кафедри будівельної механіки Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за науковою тематикою «Методологія оцінювання довговічності і продовження ресурсу елементів авіаційних конструкцій з експлуатаційними пошкодженнями біля кріпильних отворів» (Державна реєстрація №0118U003479) й кафедри міського будівництва і господарства Національного університету водного господарства та природокористування по комплексній темі «Реконструкція та утримання міських територій, будівель та інженерних комунікацій» (Державна реєстрація №0112U008294).

Участь у всіх зазначених вище науково-дослідних напрямках досліджень стали основою для розробки дисертаційної роботи.

Мета роботи – розроблення алгоритму та науково-технічних основ системного поліпшення міцнісних і деформівних властивостей суцільної деревини (листяних і хвойних порід) та композиційних матеріалів на її основі із прогнозованими характеристиками для проектування, ремонту, реконструкції, утримання та виготовлення деталей, матеріалів, виробів, конструкцій, які застосовуються в різних галузях народного господарства.

З огляду на мету роботи були поставлено такі завдання:

- розробити алгоритм поліпшення міцнісних і деформівних властивостей суцільної деревини (листяних і хвойних порід) та композиційних матеріалів на її основі з моменту зрубу до висушування, склеювання й модифікації;

- провести експериментальні дослідження зразків з суцільної, клеєної та модифікованої деревини листяних (берези, вільхи, ясена) та хвойних (модрини, сосни, ялини) порід за короткочасного стиску вздовж волокон із побудовою дійсних (повних) діаграм механічного стану матеріалу за жорсткого режиму випробувань на сучасному випробувальному обладнанні;

- експериментально дослідити міцнісні та деформівні властивості суцільної деревини різних порід і встановити особливості їх змін залежно від віку, вологи, швидкості деформування, а також впливу склеювання та модифікації;

- запропонувати способи модифікації деревини полімерною композицією «силор» і встановити оптимальний час її просочування в тіло деревини;

- запропонувати функцію описування експериментальних дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c » зразків суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі від початку завантаження і до руйнування (висхідна та спадна вітки), яка б на обґрунтованій достовірній основі врахувала вплив різних факторів;

- запропонувати універсальну формулу для визначення критичних відносних деформацій суцільної, клеєної та модифікованої деревини, яка б обов'язково враховувала пружні та пластичні властивості таких матеріалів;

- розробити алгоритм з визначення граничних відносних деформацій деревини та композиційних матеріалів на її основі;

- удосконалити методику визначення початкового модуля пружності та встановити основні фактори, що впливають на січний модуль деформацій суцільної, клеєної та модифікованої деревини;

- удосконалити методику розрахунку елементів та конструкцій з суцільної деревини й композиційних матеріалів на її основі з урахуванням дійсних (повних) та оптимізованих (з обмеженням у точці граничних деформацій) діаграм деформування матеріалу.

Об'єкт дослідження – поліпшення міцнісних і деформівних властивостей деревини та композиційних матеріалів на її основі.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан, міцність, деформівність, критичні та граничні деформації суцільної деревини й композиційних матеріалів на її основі.

Методи дослідження – аналіз літературних джерел за тематикою дисертації; експериментальні дослідження зразків з суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі за короткочасного стиску вздовж волокон

від початку завантаження до повного руйнування на сучасному випробувальному обладнанні, а також встановлення основних міцнісних і деформівних властивостей; числові та математичні методи моделювання; методи теорії деформівного твердого тіла; методи математичної статистики та системного аналізу; впровадження результатів досліджень у різні галузі народного господарства.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше розроблено алгоритм поліпшення міцнісних і деформівних властивостей деревини від зрубу до висушування, склеювання та модифікації;

– вперше встановлено основні закономірності впливу вологості, віку та швидкості деформування одновісним стиском на дійсні (повні) діаграми деформування та фізико-механічні властивості деревини листяних (берези, вільхи, ясена) та хвойних (модрини, сосни, ялини) порід за жорсткого режиму навантаження;

– вперше проведено експериментально-теоретичні дослідження композиційних матеріалів на основі суцільної деревини та полімерної композиції «силор» за поверхневої та глибинної модифікацій і обґрунтовано оптимальний час просочення;

– вперше запропоновано формулу визначення критичних відносних деформацій суцільної, клеєної та модифікованої деревини із урахуванням їх пружної та пластичної складових;

– вперше запропоновано алгоритм визначення граничних деформацій суцільної деревини за діаграмою «момент – кривина»;

– удосконалено поверхневі та глибинні способи модифікації деревини;

– удосконалено методику розрахунку елементів та конструкцій на основі деревини або композиційних матеріалів на її основі з урахуванням дійсних (повних) та оптимізованих (з обмеженням у точці граничних деформацій) діаграм деформування матеріалу;

– запропоновано апроксимуючу функцію експериментальних діаграм деформування деревини різних порід та композиційних матеріалів на її основі, яка на достовірній основі враховує вплив різних факторів.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані в даній дисертації експериментально-теоретичні результати були застосовані:

– ТзОВ «Інжинірингова компанія «Тертал» при поточному ремонті будівлі інв.№1/359 (спортзал) військового містечка №1 в/ч А0796 за адресою: Рівненська обл., м. Рівне, вул. Дубенська, 2 (ремонт підлоги, заміна вікон та дверей). Зокрема було застосовано поверхневу та глибинну модифікації дерев'яної підлоги, вікон, дверей полімерною композицією «силор»;

– ТзОВ «Інжинірингова компанія «Тертал» при реконструкції та капітальному ремонті будівлі 1/41 (хірургічне відділення), військове містечко № 1, м. Рівне – реконструкція та ремонт покриття крокв'яної системи. Зокрема розраховано крокв'яну систему за запропонованою методикою автора з урахуванням повних діаграм деформування матеріалу та проведено її підсилення за допомогою поверхневої модифікації полімерною композицією «силор»;

– деревообробним приватним підприємством «Колі». Застосовано поверхневу та глибинну модифікації полімерною композицією «силор» при виготовленні підлоги, дверей, вікон на основі суцільної та клеєної деревини;

– деревообробним підприємством ТзОВ «ОДЕК – Україна». Застосовано поверхневу та глибинну модифікації полімерною композицією «силор» при виготовленні будівельних матеріалів на основі суцільної та клеєної деревини;

– у навчальному процесі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, зокрема для студентів за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» освітньо-професійної програми «Промислове та цивільне будівництво» при розробленні робочих програм з навчальних дисциплін «Конструкції з деревини та пластмас» та «Механіка руйнування будівельних конструкцій».

Основний внесок здобувача. Всі ідеї, експериментально-теоретичні дослідження й результати викладені в дисертації, автор отримав самостійно. У наукових працях у співавторстві здобувач особисто виконав та запропонував:

- у [276] – розроблення методики теоретичних та експериментальних досліджень на сучасному випробувальному обладнанні, висновки;

- у [44, 45, 66, 67, 242, 243, 245, 274] – розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки;

- у [47, 48, 63, 338] – розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, способи поверхневої та глибинної модифікацій суцільної та клеєної деревини, опрацювання результатів, висновки;

- у [62, 65] – аналіз способів поверхневої та глибинної модифікацій суцільної та клеєної деревини, область застосування таких композиційних матеріалів, висновки;

- у [46, 64, 337] – теоретичні основи та апроксимацію діаграм механічного стану суцільної, клеєної та модифікованої деревини на основі полінома 4-го степеня;

- у [42] – функцію з визначення критичних деформацій суцільної деревини хвойних та листяних порід і композиційних матеріалів на її основі;

- у [43, 244, 272, 275] – розроблення методики з визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій (січного) суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі з урахуванням пружно-пластичних властивостей матеріалу;

- у [52] – розроблення загальної методології розрахунку конструкцій та елементів на основі деревини з урахуванням дійсних (повних) та оптимізованих діаграм деформування матеріалу;

- у [49, 50, 51, 56, 270] – основні гіпотези розрахунку; висновки;

- у [53, 54, 55, 68, 271, 319] – опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації викладені на науково-технічних та науково-практичних конференціях: «Архітектура та екологія. Проблеми міського середовища» (м. Київ, 2011 р.), «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 2012, 2014, 2018 р.), «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, Беларусь, 19–20 апреля 2012 г.), «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 16–17 листопада 2017 р., 27–28 листопада 2019 р.), «Proceedings of the 1st Eastern Europe Conference on Timber Constructions» (м. Харків, 7–8 червня 2018 р.), «Conference proceedings of the Scientific Session on Applied Mechanics X» (Bydgoszcz, Poland, 23 November 2018), «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (м. Тернопіль, 24–27 вересня 2019 р.), «Сучасні проблеми містобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Луцьк, 15 листопада 2019 р.), «Проблеми інтегрованого розвитку міст» (м. Луцьк, 29–31 січня 2020 р.), «Actual problems of science and education» (Budapest, Hungary, 2 February, 2020), «SCIENCE, SOCIETY, EDUCATION: TOPICAL ISSUES AND DEVELOPMENT PROSPECTS» (м. Харків, 10–12 травня, 2020 р.), «Інновації у будівництві» (м. Луцьк, 14 травня, 2020 р.), «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» (м. Тернопіль, 14–15 листопада, 2020 р.), «SURVEYING, CIVIL ENGINEERING, GEOINFORMATION IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT» (Bydgoszcz, Poland, June 2–10, 2020), «Eurasian scientific congress. Abstracts of the 8th International scientific and practical conference» (Barcelona, Spain, August 9–11, 2020), «Іноваційні процеси в галузі дорожнього будівництва» (м. Луцьк, 30 жовтня, 2020р.), «Ефективні технології в будівництві» (м. Київ, 19–20 листопада, 2020 р.).

Дисертаційна робота обговорювалася на науковому семінарі «Механіка, міцність матеріалів і конструкцій» у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (голова д.т.н., професор Марущак П.О.), на науковому семінарі кафедри прикладної математики та механіки у

Луцькому національному технічному університеті (голова д.ф.-м.н., доцент Пастернак Я.М.).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено в 43 наукових працях, серед них 26 статей – у наукових фахових виданнях, рекомендованих Міністерством освіти і науки України (17 – статті у наукових фахових періодичних виданнях України, 9 – статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав та у фахових виданнях України, які внесені до наукометричних міжнародних баз. Зокрема 2 наукові публікації – Scopus та Web of Science, 5 – Index Copernicus); 13 публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації; в інших виданнях – 4.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (341 найменування), додатків. Дисертаційна робота викладена на 387 сторінках (загальний обсяг). Серед них – 296 сторінок основного тексту (54 таблиці, 89 рисунків), 34 сторінки списку використаних джерел та 7 додатків на 40 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СТАН ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОТИ СУЦІЛЬНОЇ ДЕРЕВИНИ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇЇ ОСНОВІ

1.1. Будова суцільної деревини

Деревина – це конструкційний анізотропний матеріал природного походження.

Основні переваги деревини:

- 1) єдиний матеріал, який постійно відновлюється природою;
- 2) невелика густина;
- 3) легко піддається обробці;
- 4) низька теплопровідність та звукопроникність;
- 5) досить висока міцність та низька деформівність;
- 6) піддається склеюванню та модифікації;
- 7) достатня твердість;
- 8) має приємний природний колір.

Структура деревини є дуже складною у зв'язку з її неоднорідністю. В зв'язку з анізотропією важко визначити, на різних стадіях роботи, напружено-деформований стан тієї чи іншої породи деревини. Для того, щоб простіше розібратися в даному питанні необхідно детально проаналізувати її будову та склад.

Довідники з деревинознавства [22, 26, 213, 331] приводять досить детальну структуру хвойних та листяних порід, розкриваючи при цьому окремо макро- та мікроструктуру дерева. На нашу думку, тут ми маємо знайти основні відповіді на запитання про напружено-деформований стан матеріалу деревини та її основні міцнісні та деформівні властивості.

Щоб глибше зрозуміти структуру деревини, розглянемо її макро- та мікроструктурну будову. Будова деревини показана на рис.1.1.

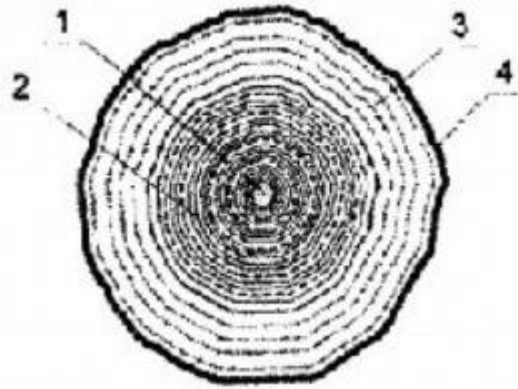


Рис.1.1. Будова деревини (1 - серцевина, 2 – ядро, 3 – заболонь, 4 – камбій, луб, кора)

Макроструктура деревини. Отже, згідно [22, 26, 213, 331], основними частинами дерева, яке росте є корінь (10–20%), стовбур (до 65%) та крони (10–15%). Корінь – це нижня частина дерева. Корінь, як правило, представлений системою, яка включає в себе дрібні корінці, які всмоктують воду з розчиненими мінеральними речовинами, і товсте коріння, яке утримує стовбур в вертикальному положенні, проводить воду і зберігає запаси поживних речовин.

Крона - сукупність гілок, одягнених листям (хвоєю). У зеленому листі проходить процес фотосинтезу, внаслідок якого утворюються складні органічні речовини, необхідні для життя і зростання дерева.

Стовбур - це частина дерева від коренів до вершини, що несе на собі гілки. Стовбур зростаючого дерева проводить воду з розчиненими мінеральними речовинами вгору, а з органічними речовинами - вниз по лубу до коріння; зберігає запасні поживні речовини; служить для розміщення і підтримки крони. Верхня тонка частина стовбура називається вершиною (до 5%), нижня товста частина - комлем.

В подальшому для експериментальних досліджень нас буде цікавити саме стовбур дерева, особливо її внутрішня частина - деревина. Міцність та деформівність деревини стовбура є змінною величиною, тому що дані показники змінюються від нижньої частини до верхньої, а також залежать від

його діаметру (віку деревини). Деревина найбільшої міцності знаходиться в стовбурі біля кореня. Згідно з дослідженнями [26] чим більший вік дерева, як правило, тим вища міцність самої деревини.

Розріз стовбура розглядається в трьох площинах: поперечному та поздовжньому - радіальному і тангенціальному. Ство́бур в поперечному напрямку складається з кори, камбію, деревини (рис.1.1).

Хімічний склад деревини є наступним: 50% вуглецю, 6% водню, 43,5% кисню та 0,5% інші елементи.

На поперечному перерізі можливо також спостерігати річні кільця. Вони добре помітні у всіх порід, але особливо добре – у хвойних. На радіальному розрізі річні кільця мають вигляд поздовжніх смуг, на тангенціальному - звивистих ліній. Річні кільця нарастають щорічно від центру до периферії. За їх кількістю можливо визначити вік дерева. Кожне річне кільце має ранню та пізню деревину. Пізня деревина характеризується підвищеними механічними властивостями.

Мікроструктура деревини. Мікроструктуру деревини можливо побачити за допомогою мікроскопів або інших способів на поздовжніх чи поперечних розрізах.

Дослідження деревини під мікроскопом показує, що вона складається з найдрібніших частинок - клітин, переважно мертвих. Основною складовою деревини є целюлоза. Целюлоза в клітинній оболонці представлена у вигляді волокон, які називаються мікрофібрилами. Проміжки між мікрофібрилами заповнені в основному лігніном, геміцелюлозами і зв'язаною вологою. У процесі росту клітинні оболонки потовщуються, при цьому залишаються непотовщені місця, які називаються порами. Пори служать для зберігання та проведення води з розчиненими поживними речовинами з однієї клітини в іншу.

Клітини однакової будови, які виконують одні і ті ж функції, утворюють тканину деревини. Відповідно до призначення і виду клітин, з яких

складаються тканини, розрізняють: запасуючі, провідні, механічні (опорні) і покривні тканини.

Запасаючі тканини складаються з коротких запасуючих клітин і служать для накопичення і зберігання поживних речовин. Провідні тканини складаються з витягнутих тонкостінних клітин (судин, трубок), через які волога, ввібрана корінням, проходить до листя. Механічні тканини (опорні) знаходяться в стовбурі. Ці тканини надають стійкість зростаючому дереву. Чим більше цієї тканини, тим деревина щільніша, твердіша, міцніша. Механічні тканини називають лібриформом. Покривні тканини знаходяться в корі і виконують захисну роль.

1.2. Основні дефекти та пошкодження деревини

Одним із основних чинників, які впливають на механічні властивості деревини, є її дефекти та пошкодження. Природні та технологічні дефекти безпосередньо впливають на клас міцності [78, 87, 96, 100, 101].

Дефектами та пошкодженнями деревини [78] називають дефекти форми стовбура, природні неоднорідності будови деревини, порушення цілісності її тканин за різними причинами, забарвлення біологічного і хімічного походження, сторонні вclusions, механічні пошкодження та дефекти обробки, які знижують якість деревини і обмежують її використання. Вони виникають в процесі росту дерева. Або в деревині при порушенні технології зберігання та переробки, а також можуть з'являтися при неправильній експлуатації різних дерев'яних виробів, елементів, конструкцій і т.д.

Згідно [78] дефекти та пошкодження деревини поділяють на наступні групи:

- сучки;
- тріщини;
- дефекти форми стовбура;
- дефекти будови деревини;

- хімічні забарвлення;
- ураження грибами;
- біологічні пошкодження;
- різного роду включення, механічні пошкодження та дефекти обробки;
- інші дефекти.

Розглянемо тільки ті дефекти і пошкодження, які безпосередньо можуть вплинути на міцність та деформівність деревини в процесі експериментальних досліджень.

Сучки – це основа гілок, які мають місце в деревині стовбура. При розпилуванні стовбура спостерігаються сучки різних форм і розмірів. Наявність сучків в деревині призводить до зниження міцності, ускладнює її обробку та склеювання, знижує якість (особливо при великій їх кількості і великих діаметрів). Значно знижують якість деревини незрощені і загнивші сучки, а в деяких випадках вони приводять деревину до непридатності для виготовлення різних виробів. Тому необхідно, по можливості, уникати наявності сучків при виготовленні різного роду виробів, особливо несучих елементів будівельних конструкцій та інших деталей і т.д. Кількість і розміри сучків залежать від породи деревини та від місця проростання дерева.

Тріщини - порушення цілісності деревини, викликане внутрішніми напруженнями найчастіше при різкому висиханні. Тріщини, особливо наскрізні, порушують цілісність лісоматеріалів і знижують їх механічну міцність.

Також негативний вплив на деревину мають дефекти форми стовбура, зокрема кривина стовбура - відхилення поздовжньої осі стовбура від прямої лінії, що виникає у всіх деревних породах. Для експериментальних досліджень необхідно відбирати дерева, які є більш прямими.

Одним із найбільше розповсюджуваних дефектів є дефекти будови самої деревини. До таких відносяться:

- нахил волокон (косошаруватість) – відхилення напрямку волокон від поздовжньої осі розпилу дерева, що негативно впливає на механічну поведінку деревини;

- крен - зміна будови деревини хвойних порід в стиснутій зоні стовбура, яка порушує однорідність будови, збільшує густину, дуже характерним є для ялини;

- викривлення - місцеве викривлення річних кілець близько сучків або проростань. Викривлення, особливо наскрізні, знижують міцність на стиск і, особливо, на розтяг вздовж волокон. При виготовленні зразків для експериментальних досліджень необхідно уникати ділянок з подібними дефектами.

Біологічні пошкодження - одним з найпоширеніших пошкоджень деревини є гниль, а також вади дерева в період росту, які не викликані біологічними шкідниками-паразитами. При цьому порушується цілісність структури матеріалу та суттєво знижується міцність.

1.3. Чинники, що впливають на міцнісні та деформівні властивості деревини

До основних чинників, що мають безпосередній вплив на фізико-механічні властивості деревини, необхідно віднести вологість, температуру, вік, густину, швидкість завантаження зразків та інші. Більш детально розглянемо ті із них, які будуть стосуватися нашої роботи.

Згідно довідників з деревознавства [22, 26, 213, 331] вологу в деревині поділяють на: а) вільну (капілярну), яка заповнює клітини і міжклітинний простір; б) гігроскопічну; в) хімічно зв'язану, яка міститься в хімічних елементах в складі деревини. Найбільший вплив на механічні властивості деревини має вільна і гігроскопічна волога.

Безпосередньо впливом вологості на деревину присвячена велика кількість праць вітчизняних та закордонних вчених, починаючи із середини минулого

століття [1, 5, 12, 19, 21, 25, 30, 34, 81, 85, 89, 114, 115, 136, 179, 200, 201, 202, 215, 288, 290, 291, 296, 298, 330, 332].

Проаналізуємо вплив вологості на основні міцнісні та деформівні властивості деревини в нашій та закордонній літературі, зокрема, міцності, початкового модуля пружності, критичних деформацій.

Закордонні вчені Kollmann F. [288], Kuffner M. [291] провівши самостійно експериментальні дослідження та аналізуючи роботи інших авторів, прийшли до висновку, що міцність деревини на розтяг вздовж волокон має екстремум в межах від 0...10 %, а потім постійно зменшується до вологості 30%, після цього є незмінною величиною (рис.1.2).

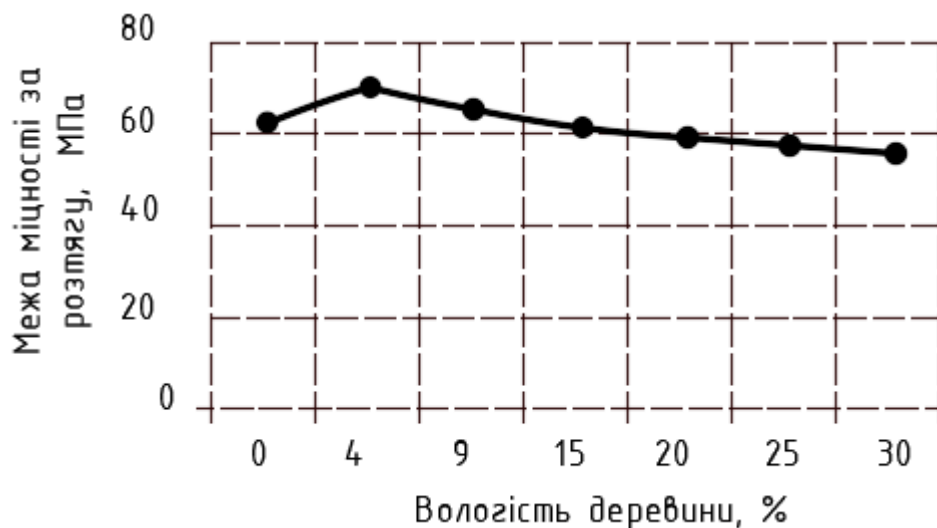


Рис. 1.2. Міцність деревини за розтягу вздовж волокон в залежності від різного показника вологості [291]

Дослідженнями одночасного впливу вологи та температури на міцність деревини за повздовжнього стиску знаходимо в роботах Белянкина Ф.П. [12], Бывших В.Д. [25], Леонтьева Н.Л. [136], які проводилися на зразках чистої деревини перерізом 20x20x30 мм. Інші автори, зокрема Madsen B. [296], Martenson A. [298], Vasic S. [329], Волынский В.Н. [34], Карабанов В.А. [114], Федосеенко И.Г. [215] також визначили межу міцності на згин, сколювання вздовж волокон, як за різної вологості, так і при одночасній дії температури та

вологості. За даними експериментальних досліджень автори зробили ряд висновків: вологість деревини має вплив на міцність деревини при будь-якій температурі та навпаки, міцність на стиск вздовж волокон, згин, сколювання є найбільшою при вологості 0% та постійно зменшується до точки насичення 30% за температури 200⁰С, після цього є незмінною величиною.

Волинский Н.В. [34], проаналізувавши фізико-механічні показники малих зразків чистої деревини [82] і показники американських та канадських стандартів [247, 248], дані по тропічних породах, встановив свої поправочні коефіцієнти впливу вологості, температури на міцність за стиску та сколювання вздовж волокон, за статичного згину, а також і для початкового модуля пружності.

Kollmann F. [288] визначив вплив вологості на початковий модуль пружності та показав зв'язок у вигляді залежості «початковий модуль пружності - вологість». Було встановлено, що як і для міцності, початковий модуль пружності має найбільше значення при абсолютно сухій деревині і потім зменшується до вологості 30%, після чого не змінюється.

Також були проведені такі ж дослідження на елементах і конструкціях [1, 5, 89, 114, 179, 215, 296]. Підтверджено, що міцність елементів та конструкцій під впливом вологи носить схожий характер, як і для малих зразків чистої деревини.

Згідно нормативних документів, на даний час, механічні характеристики матеріалів, виробів, деталей розраховуються та наводяться в діючих стандартах за стандартної вологості 12% та температури 20⁰С для зразків чистої деревини перерізом 20x20x30мм [199].

Якщо вони експлуатуються за іншої вологості та температури, то проводиться перерахунок до стандартної вологості

$$B_{12} = B_w \cdot (1 + \alpha(W - 12)) \quad (1.1)$$

та стандартної температури

$$\sigma_{20} = \sigma_t + \beta \cdot (T - 20) \quad (1.2)$$

Також в довідниках та стандартах [82, 199] представлені перерахункові коефіцієнти зв'язку між міцністю (на стиск вздовж волокон, сколювання, згин) та вологістю деревини, також вони представлені у вигляді графіка «міцність-вологість». За 1 прийнято міцність за стандартної вологості 12% (рис.1.3).

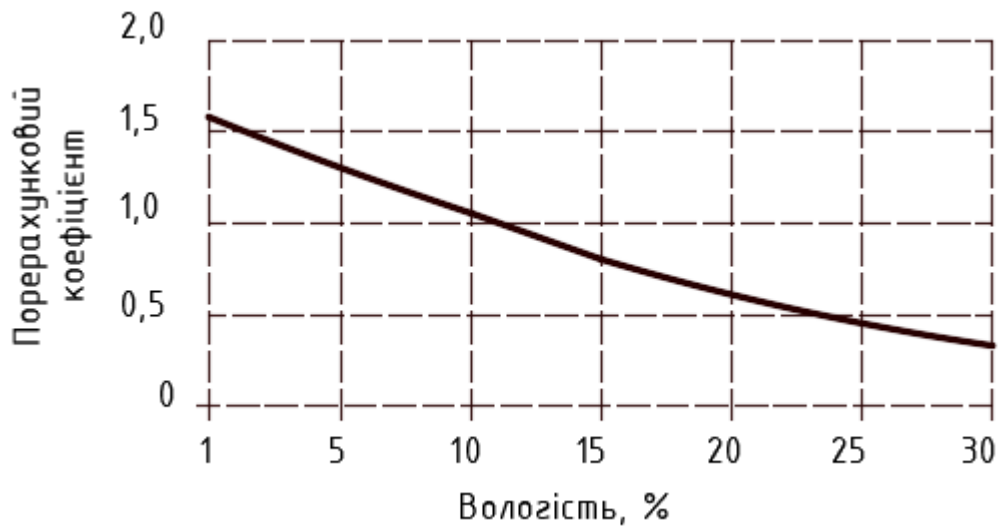


Рис.1.3. Графік перерахункових коефіцієнтів для вологості на стиск вздовж волокон згідно [22]

Для розрахунку будівельних несучих елементів, конструкцій, вузлів вплив вологи та температури враховується згідно ДБН [87] введенням коефіцієнта умов експлуатації k_{mod} .

В американських та канадських нормах [247, 248] механічні характеристики хвойних та листяних порід деревини представлені за стандартної вологості 12% та 30% для зразків перерізом 51x51x208 мм.

Отже, приходимо до висновку, що вплив вологості на міцнісні показники (міцність, початковий модуль пружності) деревини вивчений достатньо для малих зразків чистої деревини. Вплив вологості на міцнісні властивості зразків конструкційних розмірів, які враховують не тільки мікроструктуру деревини, а й макроструктуру, фактично не вивчався, за винятком показників американських та канадських стандартів та поодиноких робіт наших вчених.

Вплив вологи на деформівні властивості будь-яких зразків деревини хвойних та листяних порід практично не досліджувався взагалі (за винятком [5, 21]).

На нашу думку, одним із найменш досліджуваних чинників, що впливає на міцність та деформівність деревини є її вік.

В довідниках з деревознавства [22, 26, 213, 331] наводиться структура росту деревини та вказуються на вікові її зміни, які відбуваються в процесі життя дерев. Також вказується на те, що в будові стовбура знаходяться різновікові клітини, які відповідають за міцнісні характеристики деревини.

Тут же знаходимо певні дані про зміну міцності деревини в залежності від її віку, але таких даних є дуже обмежена кількість. Також вказується на те, що чим більший вік деревини, тим міцність є більшою, але до певного моменту.

З іншої сторони в одному стовбурі є деревина різного віку в залежності, де вона знаходиться. Відомо, що найміцніша деревина знаходиться біля пенька і її міцність дещо зменшується до вершини.

Досить таки цілеспрямовані експериментальні дослідження деревини сосни різного віку знаходимо в роботі Быкова М.К.. Автор проводив дослідження зразків віком від 20 до 125 років та встановив, що за віку 95-116 років вона має найкращі міцнісні характеристики. Також довів, що міцність при сколюванні не залежить від віку деревини.

Тутурин С.В. [210], аналізуючи дослідження інших авторів прийшов до висновку, що деревина у віці 50-100 років має найкращі фізико-механічні показники. А також вказує на те, що при випробуваннях будь-яких порід деревини обов'язково необхідно вказувати на її вік. І для порівняння досліджень деревина має бути однакового віку.

Отже, приходимо до висновку, що вплив такого фактора як вік деревини на основні фізико-механічні властивості (міцність, початковий модуль пружності, деформівність) практично не вивчений.

Досліджували вплив швидкості збільшення навантаження на зразках з різних порід деревини Любошиц М.В. [141], Перелыгин Л.М [165], Соломенцев Б.А. [203]. Експериментальні дослідження показали порівняно невеликий вплив

зміни швидкості навантаження на опір деревини при механічних випробуваннях за м'якого режиму прикладення навантаження. Так при збільшенні швидкості в 100-200 раз опір деревини стиску, розтягу, згину і сколюванню збільшується від 7% до 17%. Міцність деревини при високих швидкостях стає в деяких випадках майже постійною або мало змінюється. Таким чином, автор робить висновок, що найбільше відхилення від стандартних швидкостей суттєво не впливає на величину границі міцності.

Але є два способи завантаження зразків для випробувань - за приростом навантажень (м'який режим навантажень) та за приростом переміщень (жорсткий режим навантажень) за певної постійної швидкості. Це те, що стосується впливу короткочасних навантажень на побудову діаграми механічного стану деревини, який ми в подальшому будемо досліджувати.

В літературі приведена величезна кількість експериментальних досліджень на стиск вздовж волокон деревини та на поперечний згин, за першого способу завантаження зразків – за приростом навантажень, тому що, починаючи десь з 30-50-х років минулого століття таких досліджень проведено величезна кількість на зразках з чистої деревини.

За другого способу завантажень – із заданим приростом деформацій за певний однаковий проміжок часу або з заданим приростом переміщення плити пресу дослідження почали проводити, приблизно, починаючи з кінця минулого століття. Основною перевагою другого способу є те, що швидкість деформування зразків може контролюватися, тобто бути як постійною в часі (на протязі всього випробування), так і змінюватися. Також одночасно з цим проводиться вимірювання певних параметрів за допомогою автоматизованої системи керування та запису даних.

Проведемо певний аналіз робіт саме за такого способу завантаження.

Тутурин С.В. [210] проводив експериментальні дослідження за швидкості деформування від 0,1 мм/хв до 5 мм/хв. за різних видів прикладання сили. В подальшому прийнявши за основну – 2мм/хв. При цьому автор вказав на те, що

швидкість завантаження в таких межах практично не впливає на основні механічні параметри деревини, а тільки впливає на характер спадної вітки.

Вареник К.А. [27, 28, 29] випробував призми за постійної швидкості деформування 4 мм/хв. на електромеханічній установці WDW-200E.

В роботі [124] автор проводив експериментальні дослідження призми деревини сосни на стиск вздовж волокон на електромеханічному пресі INSTRON за швидкості 2мм/хв.

Закордонні вчені Zhou A., Bian Y., Shen Y., Huang D., Zhou M. [282-285, 341] при випробуванні зразків композиту деревини бамбука на стиск вздовж волокон проводили за швидкості 2мм/хв., а для розтягу – 0,5мм/хв.

Отже, аналізуючи доступні роботи авторів, приходимо до висновку, що вплив швидкості деформування на основні міцнісні та деформівні властивості різних порід деревини вивчено недостатньо (за винятком [210]), а також невстановлено оптимальну швидкість для таких досліджень.

1.4. Сучасне випробувальне обладнання

Донедавна преси та машини, які застосували для випробування зразків з різних матеріалів за стиску, розтягу, згину та інших видів зовнішнього впливу, працювали за м'якого режиму завантажень (за приростом навантажень) [2, 4, 8, 10, 14, 20, 24, 36, 106-112, 115, 120, 121, 125, 133-136, 153, 154, 161, 183, 216, 218, 219, 241, 251, 257, 265, 277, 288, 291, 295-297, 302, 312, 313, 325]. Це не давало в повній мірі визначити напружено-деформований стан того чи іншого зразка на протязі всього циклу роботи матеріалу. Тобто таке завантаження та обладнання давало лише змогу побудувати діаграму «напруження-деформації» до певного моменту висхідної вітки. За допомогою такого типу експериментальних випробувань неможливо визначити критичні деформації зразків, не говорячи вже про роботу в закритичній стадії (на спадній вітці). Дослідники могли встановити лише максимальні напруження того чи іншого матеріалу, за яких він починав руйнуватися.

Роботу таких випробувальних машин вдалось вдосконалити за допомогою додаткового обладнання, що дозволило більш ширше встановити міцнісні та деформівні властивості бетону та деревини повністю на висхідній вітці та частково на спадній [11, 187, 188].

Внаслідок стрімкого науково-технічного прогресу в кінці 20 ст. вчені розробили електромеханічні та сервогідравлічні універсальні випробувальні машини, які дають змогу випробовувати зразки від початку завантаження і до повного руйнування (жорсткий режим випробувань за приростом переміщень плити пресу), при цьому фіксуючи всі необхідні міцнісні та деформівні показники на висхідній та спадній вітках діаграми «напруження – деформації», встановлюючи при цьому необхідні режими та швидкості завантаження. Вимірювальні прилади визначають зусилля і деформації на різних стадіях випробувань і передають результати вимірювань на пристрої реєстрації чи засоби накопичення інформації.

Наведемо характеристики деяких таких сучасних випробувальних машин та їх можливості. Більшість з них є закордонного виробництва. До таких можна віднести електромеханічні та сервогідравлічні випробувальні машини різної конфігурації: WDW (Time Group Inc., рис.1.4), INSTRON (США, рис.1.5), РЭМ (Росія, рис.1.6), LFM (Швейцарія, рис.1.7), STM (рис.1.8) та інші.

Дане випробувальне обладнання дозволяє досліджувати різні матеріали, в тому числі і надміцні, на стиск, розтяг, згин та інші види навантажень згідно діючих світових стандартів (ISO, ASTM [247, 248], DIN, EN [102, 103], ДСТУ [97], ГОСТ [70-72, 74, 75]) для таких галузей як будівництво, судно- та машинобудування, металургії, гірничовидобувної та меблевої промисловостей та багато інших.

Керування процесом випробування зразків здійснюється за допомогою комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням. Дані машини передбачають автоматичний режим роботи, програмування параметрів випробувань, визначення поточних і максимальних значень механічних властивостей матеріалів, математичний розрахунок характеристик, візуалізацію

інформації на моніторі, формування протоколів і діаграм випробувань в електронному та друкованому вигляді.



Рис. 1.4. Електромеханічна випробувальна розривна машина WDW-200E



Рис. 1.5. Універсальні випробувальні машини INSTRON серії 5980



Рис. 1.6. Розривна випробувальна електромеханічна машина типу РЭМ-М.



Рис.1.7. Випробувальна машина LFM-600



Рис. 1.8. Універсальна сервопривідна випробувальна машина UIT STM 100S.

Сучасні випробувальні машини характеризуються великою ходом траверси і широким діапазоном швидкостей випробування, а також більшість з них оснащені змінними захватами і оснащенням, що забезпечує вирішення широкого кола завдань. Дане випробувальне обладнання нового покоління дозволяє випробовувати матеріали до 600кН.

Наші випробування зразків з деревини та композиційних матеріалів на їх основі ми будемо проводити на універсальній сучасній сервогидравлічній випробувальній машині СТМ-100.

1.5. Експериментальні дослідження діаграм «напруження σ_c – деформації ϵ_c » за м'якого та жорсткого режиму випробувань

Роботою деревини [2, 4, 8, 10, 13, 14, 19, 20, 24, 30, 36, 106-112, 115, 120, 121, 125, 133-136, 153, 154, 161, 162, 166, 167, 183, 216, 218, 219, 231, 239, 241, 251, 257, 265, 277, 288, 291, 295-297, 299, 302, 312, 313, 325, 333] та дерев'яних

конструкцій [15, 83-85, 88-90, 92, 104, 113, 114, 126, 132, 137, 140, 151, 152-155, 157, 158, 160, 171, 172, 179, 181, 191, 193-195, 197, 198, 204-206, 220, 221, 252, 254, 259, 265, 280, 286, 293, 307, 314, 318, 326, 340] за м'якого режиму випробувань (за приростом навантажень) займалося величезна кількість вітчизняних та закордонних вчених. Основним недоліком таким випробувань є побудова діаграми «напруження σ_c - деформації u_c » тільки до певної точки висхідної вітки (рис.1.9). З даної діаграми можливо тільки встановити максимальне напруження зразка та деформівність тільки до певної точки, а інші не менш важливі характеристики (критичні, граничні та остаточні деформації та відповідні міцнісні показники) визначити неможливо.

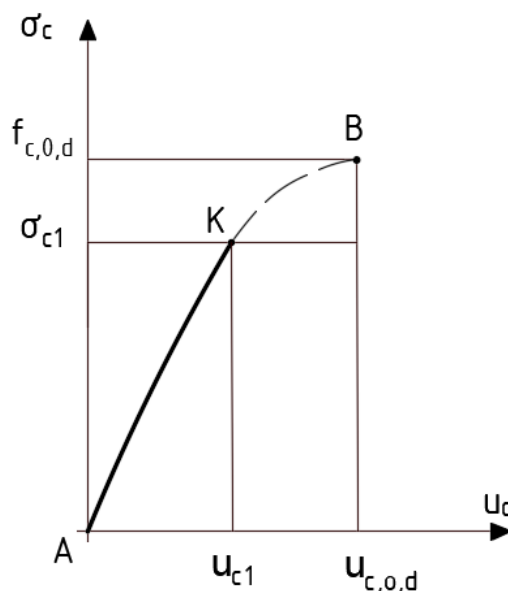


Рис. 1.9. Діаграма деформування деревини на стиск вздовж волокон за м'якого режиму випробувань

Випробування зразків (будь-якого матеріалу) за жорсткого режиму можливо провести на нових пресах (жорстких випробувальних машинах) різної конфігурації або на спеціально виготовленому випробувальному обладнанні [11, 187, 188].

Жорсткі режими завантажень при дослідженні матеріалів [28, 29, 124, 209-211, 238, 246, 261, 282-285, 335, 336] проводять на випробувальних машинах нового покоління із заданим приростом деформації за певний однаковий проміжок часу або з заданим приростом переміщення плити пресу. Внаслідок

цього відбувається зміна навантаження від початку завантаження аж до руйнування зразка із заданою постійною швидкістю. Також на таких випробувальних машинах можливо задавати швидкість переміщення, час завантаження, цикли завантажень та інші параметри, що цікавлять дослідника. Разом з роботою випробувальної машини (преса), працює приєднане сучасне додаткове обладнання (комп'ютер). Програмне забезпечення комп'ютера дозволяє задавати різні параметри навантажень для випробувань, а також фіксувати зміну деформацій та зміну навантаження на протязі всього випробування аж до повного руйнування зразка. Це обладнання дозволяє побудувати повну діаграму механічного стану « σ_c-u_c » в режимі реального часу, тобто діаграму зі спадною віткою, а також дозволяє з високою точністю розкрити та описати реальний напружено-деформований стан елемента від початку завантаження і аж до кінця руйнування.

Використання спеціально переобладнаного старого обладнання також дозволяє отримувати спадну вітку діаграми «напруження-деформації», але більш складним способом. В Україні такими способами досліджували різні будівельні матеріали Бамбура А.М. [11], Роговий С.І. [178] випробовували бетонні та залізобетонні зразки різного перерізу; Сасовський Т.А. [188] – призми з суцільної деревини.

Для подальших досліджень найбільший інтерес для нас становлять експериментальні випробування за жорсткого режиму прикладання навантаження, тому більш детально зупинитися на цьому способі та розглянемо більш детально результати уже проведених та оприлюднених випробувань елементів з деревини.

Дослідження Тутурина С.В. На початку нашого століття вагомий вклад в дослідження діаграм « $\sigma-u$ » деревини сосни за жорсткого режиму випробувань на стиск вздовж волокон та згин зробив Тутурин С.В. [209-211, 238]. Детально зупинимось на його дослідженнях.

Автор проводив експерименти різних дерев'яних елементів сосни суцільного перерізу на стиск вздовж та поперек волокон, згин з постійною

швидкістю деформування на сучасній випробувальній машині (пресі) INSTRON (Великобританія). Вік дерев, з яких виготовлялись зразки, складав 80-90 років. Досліджувані елементи виготовлялись із брусів, коли вологість досягла 14-16% за природного висушування в приміщенні. Велику увагу Тутурин С.В. приділив масштабному фактору зразків сосни, враховуючи попередні дослідження Свеницького Г.В. [191] на стиск та Знаменського Е.М. [104] на згин. Автор відкинув можливість дослідження на стиск зразків перерізом 20x20x30 мм, які закладені в діючих нормах, у зв'язку з неврахуванням макро- та мікроструктури деревини при такому перерізі. Аналізуючи роботи попередніх досліджень, автор прийшов до висновку, що при роботі деревини на стиск розміри дерев'яних призм повинні прийматися в співвідношенні від 1/3 до 1/7 (співвідношення перерізу до висоти). Співвідношення більші за 1/7, на думку автора, призводять до втрати стійкості елемента. Отже, всі дослідні елементи при роботі на стиск автором приймалися в співвідношенні 1/3 (перерізу до висоти), а 1/7, 1/8 – для згину.

В подальшому більш детально зупинимось на дослідженнях Тутурин С.В. на стиск вздовж волокон. Переріз зразків сосни автор приймав з перерізом 30x30x90 мм, 40x40x120 мм, 50x50x150мм, 60x60x180мм, 70x70x210 мм. Кількість зразків, які були прийняті для випробувань на стиск вздовж волокон, складала приблизно 140 шт.

Також дослідник виділив основні фактори, які безпосередньо впливають на міцність деревини. Це, зокрема, вологість, об'ємна вага, місце розташування деревини в стволі дерева, самого віку дерев, пороків деревини, а також в якому ґрунті росли дерева. Для зменшення впливу цих факторів дослідник приймав умови, які максимально знизять їх вплив (вологість – 12%, ідеальне місце розташування в стволі при максимальній міцності, тобто недалеко від пенька, при найменших пороках або взагалі без них). Отже, найбільший вплив на міцність був у вигляді об'ємної ваги.

Експеримент проводився за жорсткого режиму випробувань з використанням пресу INSTRON. Навантаження прикладалось у вигляді

приросту переміщення захватів преса. Всі дані експерименту (напруження та переміщення) передавались на комп'ютер.

Руйнування зразків деревини сосни за стиску вздовж волокон відбувалось, приймаючи лавиноподібний характер. Автор, знаючи величину максимального навантаження, заздалегідь зменшував швидкість завантаження в критичній стадії перед руйнуванням, щоб розтягнути цей процес максимально довше в часі, але це не вдалося. Призми руйнувались миттєво на дрібні частинки (в зоні руйнування).

Автор задавався питанням: «Яким чином руйнуються зразки?». Відповідь, звичайно, знаходилась на діаграмах побудованих за результатами експериментальних досліджень зразків деревини сосни, які випробовувались на стиск вздовж волокон короткочасним навантаженням з постійною швидкістю деформування.

Проаналізуємо отриману Тутуриным С.В. діаграму детально (рис. 1.10). Отже, аналізуючи графік «навантаження - переміщення плити пресу», дослідник прийшов до висновку, що при досягненні зразком максимального навантаження значення деформацій не є найбільшими. Тобто деревина продовжує працювати (спадна вітка діаграми). Призма із сосни досягає значення максимальних деформацій через певний інтервал часу, при цьому навантаження зменшується, тоді і відбувається руйнування зразка.

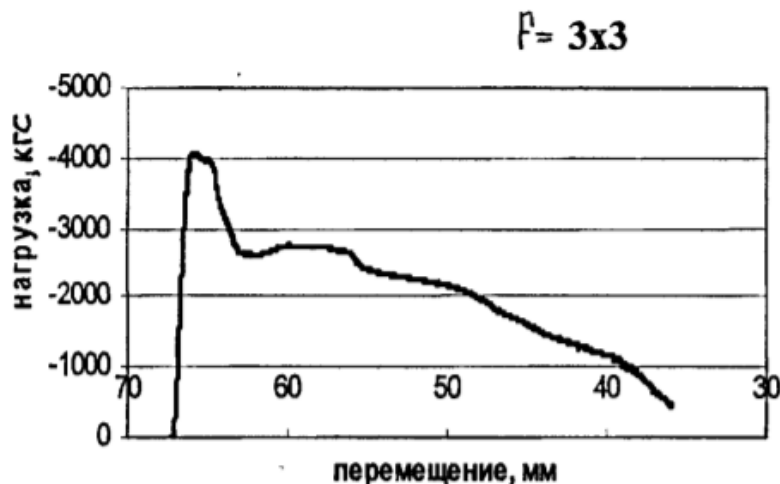


Рис.1.10. Діаграма «навантаження – переміщення плити пресу» за повздовжнього стиску

Отже, основною перевагою випробувань за жорсткого режиму є те, що зразок руйнується при досягненні ним максимальних деформацій (спадна вітка діаграми), а не максимальних напружень, як вважалося раніше (м'який режим випробувань).

Автор доводить те, що зразок руйнується в зоні утворення складки, яка обмежується об'ємом. На сусідніх ділянках зі складкою деревина залишається неушкодженою. Деревина руйнується миттєво, але при цьому до моменту руйнування проходять зміни в стінках клітковини на протязі певного часу. Тобто зразок руйнується по лінії ковзання. Дослідник також наполягає на тому, що лінії ковзання виникають внаслідок зміни внутрішньої структури деревини під дією навантаження.

При побудові діаграми «навантаження–переміщення плити пресу» на стиск вздовж волокон (рис.1.10) дослідник виділяє три ділянки на висхідній вітці:

1) перша ділянка (приблизно до 800 кг) – це є місцеве зминання деревини, при цьому ріст деформацій випереджає ріст навантаження;

2) друга ділянка – від 800 кг закінчується місцеве зминання деревини, зразок починає зміцнюватись і працює у вигляді прямої до $0,6 P_{\max}$. Після цього лінія викривляється. Це, на думку автора, починаються незворотні деформації;

3) третя ділянка – лінія ще більше викривляється, рухаючись при цьому до максимального напруження. На цій ділянці (за максимального напруження) починають утворюватися лінії ковзання.

Після досягнення деревини максимального навантаження (напруження) починається другий етап роботи зразка – спадна вітка діаграми «навантаження - переміщення плити пресу» (рис.1.10). Характерною ознакою цього етапу є те, що при зменшенні напружень деформації швидко наростають. Дослідник виділяє 5 ділянок на спадній вітці діаграми:

1) перша ділянка – це є зростання ліній ковзання, при цьому зразок розділяється на два блоки;

2) друга ділянка – тимчасове зміцнення деревини, зміна структури не спостерігається, волокна загинаються, відбувається тимчасове збільшення напружень;

3) третя ділянка – це є найдовша ділянка, навантаження зменшується, утворюються нові тріщини;

4) четверта ділянка – спостерігається невеличке зміцнення зразка, частина волокон починає руйнуватися, інша частина – продовжує чинити опір навантаженню;

5) п'ята ділянка – навантаження стрімко падає, зразок остаточно втрачає стійкість та руйнується.

Після проведення експерименту дерев'яної призми дослідник зауважив, що зразок руйнується не стільки внаслідок розриву крайніх волокон, а через появу поздовжніх тріщин та відшаровування волокон одне від одного.

Також автор прийшов до висновку, що на роботу деревини також безпосередньо впливає швидкість деформування. При збільшенні швидкості спостерігається втрата деяких ділянок спадної вітки діаграми «навантаження – переміщення». Тутурин С.В. зауважив, що при досягненні зразка сосни $0,5P_{\max}$ відбувається зміцнення деревини.

Результати експериментальних досліджень в подальшому автором були використані для розробки синтетичної теорії міцності деревини за допомогою наступних інваріантів τ_{\max} , σ_n , μ_σ .

Дослідження Вареника К.А. Дещо пізніше Вареник К.А. [28, 29, 186] також отримав діаграми «напруження-деформації» для деревини сосни на стиск вздовж волокон за жорсткого режиму випробувань.

Переріз зразка, який піддавався випробуванню на стиск вздовж волокон, мав розміри 30x30 мм з висотою 120 мм. Відношення величини поперечного перерізу до висоти складало 1/4. Висушування брусів до певної вологості проводилась в спеціальній камері при постійній температурі, яка складала 50⁰С. Після цього брус розпиллювався на необхідні за розміром зразки. В приміщенні

природним кондиціюванням призми доводилась до необхідної вологості, яка на момент випробувань складала 10%, за певний період часу.

Кількість зразків деревини сосни, які досліджувались на стиск вздовж волокон, складала 16 шт. Деревина випробовувалась в електромеханічному пресі WDW-200E з максимальним навантаженням 200 кН. До випробувальної машини також під'єднувалось спеціальне обладнання, за допомогою якого також можливо задавати різні режими завантажень, регулювати швидкість завантаження і т.і. Швидкість деформування при цьому складала 4мм/хв, зразок руйнувався приблизно через 1 хв після початку випробувань.

За допомогою спеціального обладнання до випробувальної машини WDW–200E були побудовані діаграми «навантаження–переміщення» та «навантаження–час».

Також автором в роботі наведено діаграми « σ - ϵ » зі спадною віткою для кожного зразка деревини сосни, які отримані на основі експериментальних діаграм.

Дослідник провів апроксимацію діаграм «напруження-деформації» за допомогою поліноміальних залежностей. Детальніше цей процес ми проаналізуємо в наступних розділах даної роботи.

Дослідження Da Silva A., Kyrakides S. Експериментальними дослідженнями деревини бальзи (тропічної породи, яка росте в Еквадорі) за жорсткого режиму випробувань присвячені роботи таких закордонних вчених як Da Silva A., Kyrakides S. [261]. Дослідники побудували повні діаграми деформування матеріалу на висхідній та спадній вітці, а також показали роботу матеріалу в закритичній стадії роботи (рис.1.11).

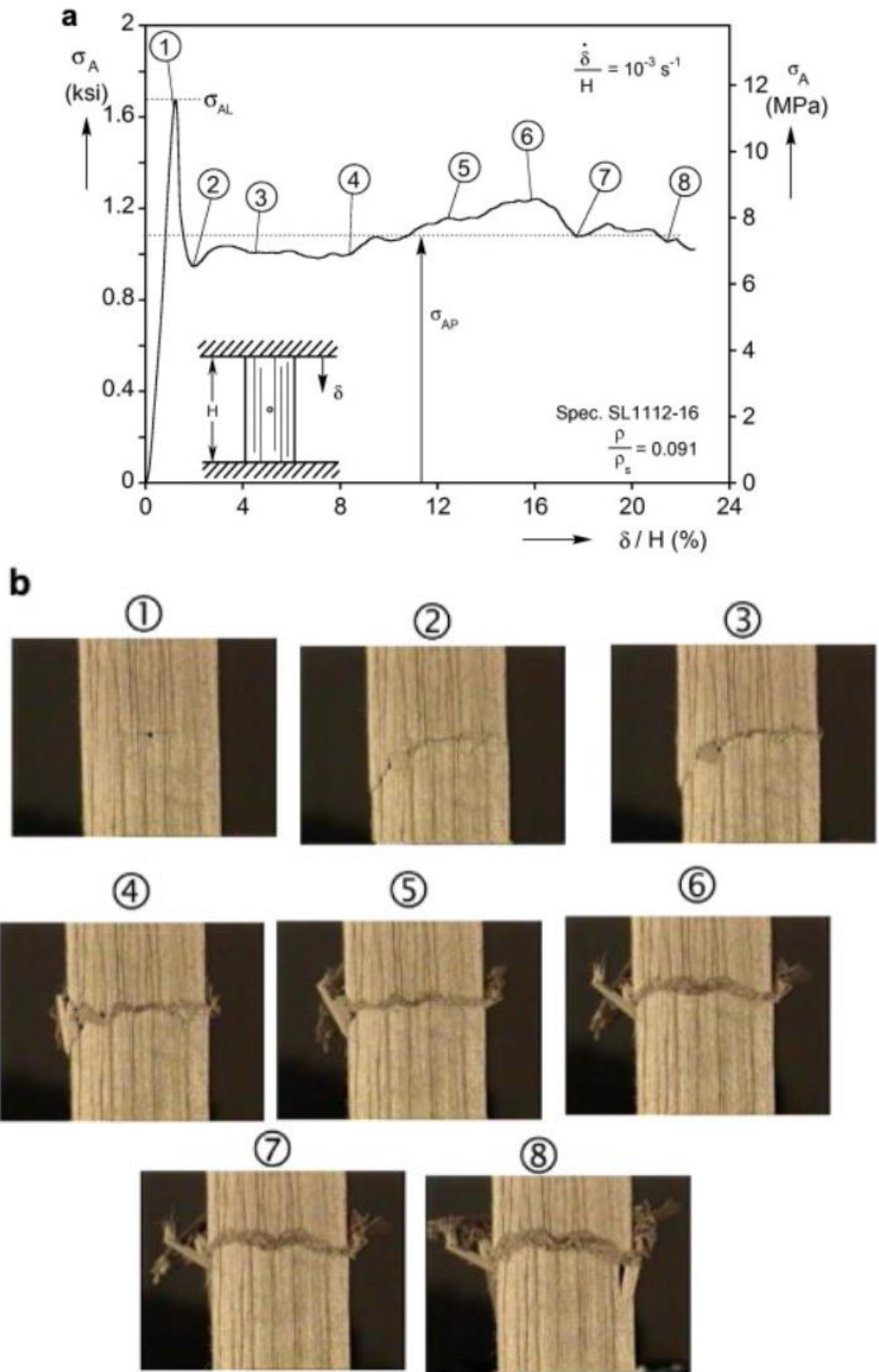


Рис. 1.11. Повна діаграма деформування деревини бальзи – а, робота матеріалу в за критичній стадії роботи – б.

1.6. Критичні деформації суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі

При побудові діаграми «напруження-деформації» суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі на стиск вздовж волокон велику роль відіграє визначення основних її параметрів експериментальним та теоретичним шляхом, в тому числі і критичних деформацій.

Більшість досліджень, що проводились на теренах Радянського Союзу, проводилось випробуванням малих зразків деревини перерізом 20x20x30 мм за м'якого режиму навантажень (за приростом навантажень), що не дозволяло досліджувати напружено-деформований стан в передруйнівному періоді роботи, тобто в передкритичній та закритичній стадії механічного стану матеріалу. Вчені могли встановити тільки максимальні напруження при руйнуванні, а більш-менш точне визначення значень критичних деформацій в той час було практично неможливим. Дослідники могли тільки прогнозувати їх значення, не підтверджуючи результати експериментом.

Гринкруг Н.В. [81], аналізуючи роботи з експериментальних досліджень деревини, що були проведені до неї, вказує на те, що критичні деформації суцільної деревини знаходяться в межах $u_{c,0,d}=0,0030\dots 0,0060$. В середньому складає $u_{c,0,d}=0,0055$.

Інші автори наводять дещо інші показники.

Зокрема, Коченов В.М. [126], аналізуючи роботу діаграми «напруження-деформації» встановив, що відносні деформації суцільної деревини за максимального напруження становлять $u_{c,0,d}=0,0112$.

В роботі Губенка А.Б. [83, 84] ці числові значення мають дещо інших характер $u_{c,0,d}=0,0087$.

Також И.С. Воронюк [35] встановив, що числове значення критичних деформацій суцільної деревини на рівні $u_{c,0,d}=0,0085$.

З появою випробувальних машин, які дозволяють побудову повної діаграми роботи деревини та композиційних матеріалів на її основі, як за

постійної, так і змінної швидкості завантаження зразків (жорсткий режим випробувань за приростом переміщень) з'явилася можливість більш точно встановити значення критичних деформацій деревини .

Зокрема, такі експериментальні дослідження знаходимо в роботах Тутуріна С.В. [209, 210, 238]. Автор випробовував зразки сосни різних конструкційних розмірів за різного режиму навантажень та встановив, що критичні деформації на стиск вздовж волокон знаходяться в межах $u_{c,0,d}=0,00401\dots0,00599$.

Дещо пізніше Вареник К.А. [28, 29, 186] також проводив експеримент на призмах сосни перерізом 30x30x120 мм за такого режиму навантажень. Дослідник отримав показник критичних деформацій дещо більшими на рівні $u_{c,0,d}=0,00843$.

Для композиційних матеріалів на основі деревини також проводились такі дослідження, зокрема знаходимо роботах китайських вчених Zhou A., Bian Y., Shen Y., Huang D., Zhou M. [341]. Автори проводили випробування композиційних матеріалів на основі деревини бамбука на стиск та розтяг вздовж волокон, визначаючи при цьому критичні деформації таких матеріалів експериментальним шляхом.

Da Silva A., Kyrakides S. [261] встановили критичні деформації для деревини бальзи.

Отже, аналіз літературних джерел показує, що наявних експериментальних досліджень зі встановлення критичних деформацій деревини та композиційних матеріалів на її основі є досить небагато. Що ж стосується теоретичних досліджень, то їх є ще менша кількість.

Тільки в роботі Гринкруг Н.В. [81] знаходимо формулу для визначення критичних деформацій суцільної деревини

$$u_{c,0,d} = (735,825 \cdot \sqrt{f_{c,0,d}} - 3,902) \cdot 10^{-3} \quad (1.3)$$

Дана залежність отримана на базі статистичної обробки даних методом найменших квадратів на основі експериментальних досліджень - Соболева Ю.В. [200], Леннова В.Г. [134, 135], Вареника А.С. [27], Иванова А.М. [106].

Авторка встановила залежність між критичними відносними деформаціями та максимальними напруженнями (рис.1.12).

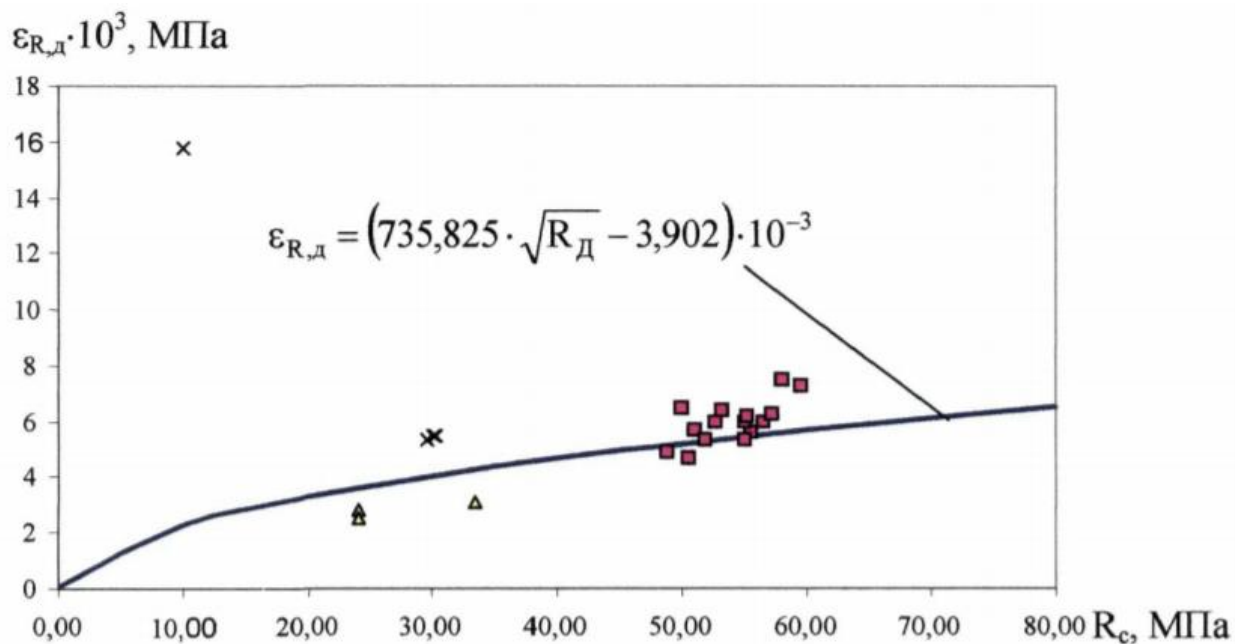


Рис.1.12. До визначення критичних деформацій деревини

Аналізуючи експериментальні дослідження, що проведені раніше, приходимо до висновку, що критичні деформації суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі можливо встановити тільки на сучасних випробувальних машинах за жорсткого режиму випробувань. На даний момент кількість таких досліджень на такому обладнанні на стиск вздовж волокон є досить обмеженою. При цьому вплив вологості, віку та варіації із швидкістю деформування на критичні деформації суцільної деревини листяних та хвойних порід практично взагалі не вивчався. Також є обмежена кількість досліджень, що пов'язана з композиційними матеріалами на основі деревини (клеєної та модифікованої). Також ми бачимо, що числові значення, які отримали автори, методом прогнозування (за приростом навантаження), так і на сучасних випробувальних машинах, різняться навіть для однієї і тієї ж породи деревини. Дуже мала кількість досліджень, що стосується листяних порід деревини.

З іншого боку критичні деформації теоретичним шляхом таких матеріалів також мало досліджені. Формула (1.3) є емпіричною, залежить тільки від

максимального напруження та в повній мірі, на нашу думку, не може встановити істинні значення таких деформацій. А також в ній не виділено дві обов'язкових складові: пружну та пластичну. Також за допомогою даної залежності важко встановити вплив вологості та віку на критичні деформації суцільної деревини. І вона непридатна для встановлення критичних деформацій клеєної та модифікованої деревини.

1.7. Граничні деформації суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі

Граничні деформації будь-якого матеріалу, в тому числі суцільної деревини та її композиційних похідних, знаходяться на спадній вітці діаграми «напруження – деформації», тобто робота матеріалу проходить в закритичній стадії роботи.

Про граничні деформації деревини в літературі практично взагалі не згадується.

Про такі деформації говорять вчені, які вивчають роботу бетону та залізобетонних елементів. Одні стверджують, що граничні деформації є остаточними деформаціями при певній залишковій міцності матеріалу, інші – вважають, що вони не є остаточними, а це питання пов'язане з роботою бетону, що відповідає критичним деформаціям в бетонному чи залізобетонному елементі.

Останнє твердження є більш справедливим.

Найбільш близькими до розв'язання даного питання в теорії бетону та залізобетону є Павліков А.М. [156] та Ромашко В.М. [180]. Автори вважають, що робота бетону у закритичній стадії необхідно пов'язувати з напружено-деформованим станом самого елемента чи конструкції. Граничні деформації бетону необхідно визначати за екстримальним критерієм несучої здатності

$\frac{dM}{d\left(\frac{1}{r}\right)} = 0$, тобто за допомогою кривини елемента.

В подальшій нашій роботі ми також спробуємо визначити граничні деформації суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі таким способом. На мою думку, наша задача буде дещо спрощеною, тому що непотрібно визначати вплив арматури в таких елементах та конструкціях. З іншої сторони необхідно врахувати вплив модифікації для модифікованих та клеєних елементів на основі деревини листяних та хвойних порід.

1.8. Модулі пружності деревини та композиційних матеріалів на її основі

Один із основних показників діаграми «напруження–деформації» є початковий модуль пружності та модуль деформацій.

Є декілька способів з визначення таких показників. Більшість з цих способів стосується початкового модуля пружності.

Нормативні документи пропонують визначати початкові модулі пружності деревини окремо для стиску, розтягу та згину [70-73, 75].

Початковий модуль пружності деревини на стиск вздовж волокон визначається на зразках перерізом 20x20x60 мм за вологості в межах 8...30% та більше в такій послідовності [71]:

а) для вимірювання деформацій на протилежних сторонах зразка встановлюють тензometri – по одному на кожену сторону;

б) кожний зразок навантажують 6 разів в межах від 1000 Н до 4000 Н та знімають покази тензодатчиків. Навантаження проводять зі швидкістю 5000 ± 1000 Н/хв.

Модуль пружності зразків деревини визначають за наступною формулою

$$E_w = \frac{p \cdot l}{a \cdot b \cdot \Delta l}, \quad (1.4)$$

де p – навантаження, різниця між верхніми та нижніми межами навантаження;

l – база тензometра;

$a=20$ мм, $b=20$ мм – розміри поперечного перерізу досліджуваного зразка;

$$\Delta l = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{2} - \text{середня величина переміщення,}$$

де $\Delta l_1, \Delta l_2$ – переміщення по кожному тензометру.

Якщо вологість деревини є стандартною 12%, то $E_w = E_0$.

Якщо зразок має вологість в межах 8...29%, то проводиться перерахунок початкового модуля пружності деревини до стандартної вологості за формулою

$$E_{12} = \frac{E_w}{1 - \alpha \cdot (W - 12)}, \quad (1.5)$$

де E_w – модуль пружності зразка з вологістю W на момент випробувань;

α – поправочний коефіцієнт рівний 0,012 для всіх порід деревини;

W – вологість деревини на момент випробувань, %.

Якщо зразок має вологість 30% і більше, то також проводиться перерахунок початкового модуля пружності деревини до стандартної вологості за такою формулою

$$E_{12} = E_w \cdot K_{12}^{30}, \quad (1.6)$$

де K_{12}^{30} – коефіцієнт перерахунку при вологості 30%, рівний: 1,25 – для хвойних порід; 1,12 – для кільцево судинних порід; 1,3 – для бука; 1,23 – для берези та інших розсіяно судинних порід.

Для малих зразків деревини перерізом 20x20x30 мм початкові модулі пружності для більшості листяних та хвойних порід деревини за стандартної вологості 12% наведені в [82].

Аналогічним чином відбувається визначення модуля пружності модифікованої деревини на стиск вздовж волокон перерізом 30x30x60 мм тільки за стандартної вологості 12% [73]. Кожен зразок такої деревини навантажують вже в межах від 5000 Н до 20000 Н. Швидкість навантаження зразків в межах 170 ± 30 Н/с. Модуль пружності модифікованої деревини осьовому стиску вздовж визначається за формулою

$$E = \frac{p \cdot l}{b \cdot h \cdot \Delta l} \cdot 10^{-6}, \quad (1.7)$$

де b, h – відповідно ширина та товщина зразка.

Модулі пружності клеєної деревини на стиск вздовж волокон [75] визначаються для перерізів 20x20x80 мм за стандартної вологості 12%. Кожен зразок завантажують в межах 5 до 25% від руйнівного навантаження P_{max} та обчислюють за наступною залежністю

$$E = \frac{P \cdot l}{b \cdot h \cdot \Delta l}, \quad (1.8)$$

де P – навантаження, різниця між верхньою межею $0,25P_{max}$ та нижньою межею $0,05P_{max}$ руйнівного навантаження;

b, h – відповідно ширина та товщина зразка.

Модулі пружності деревини для статичного згину визначаються за тим же сценарієм [70], що і для стиску вздовж волокон. В даному випадку переріз зразків 20x20x300 мм навантажують від 300 Н до 800 Н зі швидкістю 1200 ± 300 Н/хв та визначається для вологості 8...30% за формулою

$$E_w = \frac{3 \cdot p \cdot l^3}{64 \cdot b \cdot h^3 \cdot f}, \quad (1.9)$$

де f – прогин зразка в зоні чистого згину.

Якщо зразок має вологість відмінну від стандартної, то відбувається поррахунок модулів пружності до стандартної за тими ж залежностями, що і на стиск вздовж волокон (1.5), (1.6).

Також стандарти дають змогу нам визначити модулі пружності деревини за розтягу вздовж волокон [72], за аналогією зі стиском вздовж волокон та статичним згином, перерізом 4x20x300 мм навантажують від 500 Н до 1500 Н зі швидкістю навантаження 2000 ± 500 Н/хв та знаходять за формулою

$$E_w = \frac{p \cdot l}{a \cdot b \cdot \Delta l}, \quad (1.10)$$

В подальшому проводиться перерахунок до стандартної вологості за формулами (1.5), (1.6).

За канадськими та американськими стандартами ASTM [247, 248] зразки для визначення початкового модуля пружності на стиск вздовж волокон мають

переріз конструкційних розмірів 51x51x210 мм, що дає можливість врахувати не тільки мікроструктуру суцільної деревини, але і її макроструктуру. І тому на таких зразках основні показники міцності і деформівності є більш точними. В ASTM початкові модулі пружності наведені за вологості 12% та 30%.

Гринкруг Н.В. [81] пропонує визначати початковий модуль пружності суцільної деревини на стиск вздовж волокон на основі експериментальних досліджень [106, 134, 135, 200] за наступною залежністю (рис.1.13)

$$E_0 = \frac{f_{c,0,d} \cdot 10^3}{0,06 \cdot f_{c,0,d} + 0,999}, \quad (1.11)$$

Формула (1.11) залежить тільки від максимального напруження деревини на основі обмеженої кількості експериментальних досліджень попередників на малих зразках.

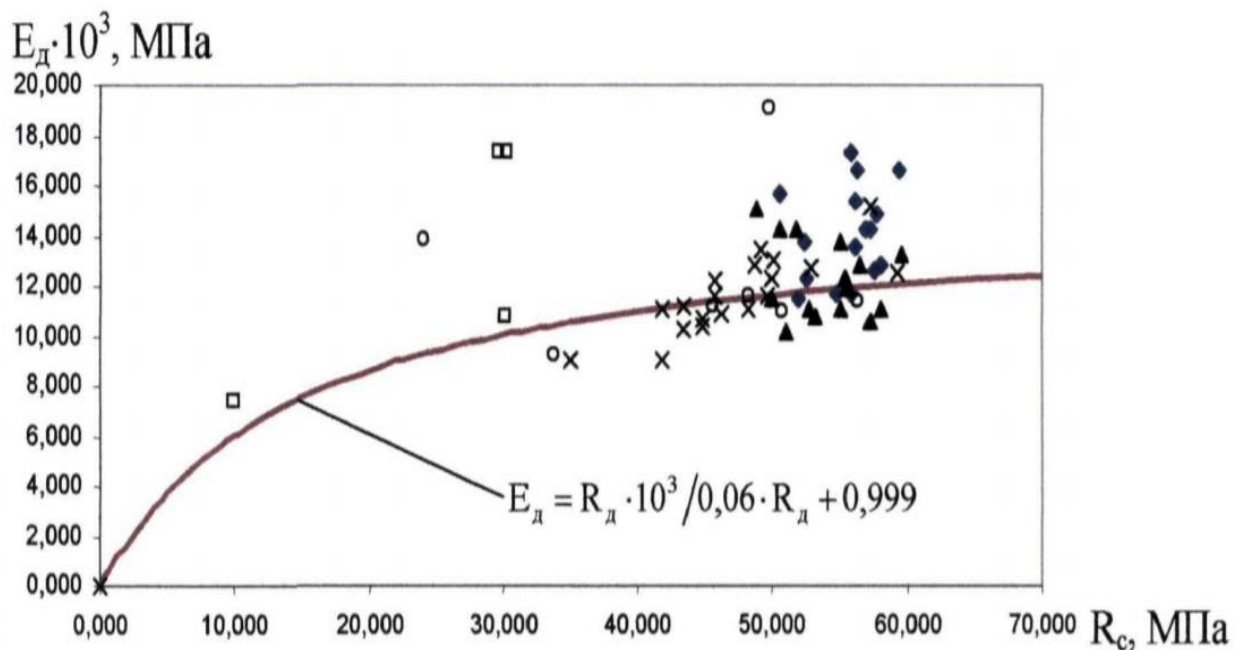


Рис. 1.13. До визачення початкового модуля пружності деревини

Ясній П.В. [246] запропонував встановлювати модуль пружності методом ітерацій. На основі якого можливо визначати E , як для пружних, так і пластичних матеріалів.

На основі аналізу з визначення модулів пружності деревини та композитів на її основі приходимо до наступних висновків:

а) наведені способи знаходження модулів пружності визначаються в основному на малих зразках, окрім канадських та американських стандартів ASTM, що дає можливість при такому дослідженні врахувати тільки мікроструктуру деревини. Макроструктура практично не враховується;

б) всі вище наведені способи враховують тільки пружні властивості деревини, і не враховують пластичні (за винятком [143, 246] ;

в) модуль пружності, як правило, визначається тільки на нижніх рівнях навантаження, що унеможливорює спостерігати його зміну на протязі всього випробування до повного руйнування.

Отже, необхідно запропонувати такий спосіб з визначення модуля пружності, щоб враховувати викладені недоліки. Зразки для експериментальних випробувань повинні бути конструкційних розмірів, а результати самих випробувань, що проводяться, повинні враховуватися від початку завантаження і до руйнування. Також тут має враховуватися пружно-пластичність деревини та композиційних матеріалів на її основі, а також визначатися їх зміна внаслідок впливу зовнішніх навантажень протягом всієї роботи зразка з урахуванням одночасної зміни міцнісних та деформівних властивостей матеріалу.

1.9. Клеєна деревина

Клеєну деревину поділяють на три види: пошарова клеєна (продукція, яка отримана зі шпону – фанера, фанерні плити, ультралам LVL, гнукотклеєні вироби), суцільна клеєна (клеєні дошки, бруси та інші клеєні вироби) та комбінована клеєна деревина (столярні плити).

Більш ширше розглянемо суцільну клеєну деревину.

Експериментальними та теоретичними дослідженнями суцільної клеєної деревини та конструкцій займалися такі вчені як [4, 5, 20, 88, 111, 118, 129, 130,

133, 151, 152, 157, 158, 160, 162, 173, 181, 183, 188, 194, 196-198, 205, 214, 218, 219, 221, 224, 226, 230, 279, 282-285, 341].

1.9.1. Міцність суцільних клеєних з'єднань

Згідно чинних нормативних документів [97, 102, 103] суцільну клеєну деревину випробовують, визначаючи границю міцності клеєного з'єднання за наступних видів навантаження:

- при сколюванні вздовж волокон деревини;
- при пошаровому сколюванні вздовж волокон деревини;
- за розтягу вздовж волокон деревини.

Визначення міцності клеєного з'єднання при сколюванні деревини вздовж волокон.

Для визначення міцності клеєного з'єднання при сколюванні деревини вздовж волокон випробування проводять на зразках згідно [97]. Випробування проводять в спеціальних випробувальних машинах. Зразок навантажують безперервно від 2 до 10 мм/хв. Межу міцності клеєного з'єднання при сколюванні деревини вздовж волокон визначають за формулою

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad (1.12)$$

де P – руйнівне зусилля, Н;

A – площа клеєного з'єднання, м².

Визначення міцності клеєного з'єднання при пошаровому сколюванні деревини вздовж волокон.

Такий метод застосовують при заводському контролі виготовлення виробів та конструкцій. При цьому зразки випилюють із торцевих частин виробів чи конструкцій. Зразки для випробувань вирізують у вигляді призм перерізом 50x50 мм та висотою h (висота конструкції). Зразок випробовують до руйнування з постійною швидкістю, визначають міцність з'єднання.

Визначення міцності клеєного з'єднання за розтягу вздовж волокон деревини

Цей метод призначений для проведення випробувань, щоб отримати дані для подальшої класифікації клеїв. Випробування ґруновані на дослідженні зразків деревини бука у вигляді одного клеєного з'єднання. Зразок випробовують до руйнування з постійною швидкістю, визначають міцність з'єднання.

1.9.2. Експериментальні дослідження клеєної деревини на стиск вздовж волокон

Вчені, які досліджували та досліджують суцільну клеєну деревину, як правило, розглядають клеєне з'єднання, як з'єднання певної дерев'яної конструкції чи виробу. І тому проводять розрахунок міцності клеєного з'єднання, а не як окремо взятого зразка. Якщо ж розглянути клеєний зразок з точки зору композиційного матеріалу, то ми приходимо до висновку, що його ще й треба досліджувати як окремий елемент. Для цього необхідно проводити випробування дерев'яних суцільних клеєних зразків за міцністю та деформівністю на стиск вздовж волокон. Таких досліджень в даний час, на жаль, не є так багато.

В роботі [183] автор наводить міцність клеєних з'єднань сосни за різних схем навантаження:

- при сколюванні – 9,7 МПа;
- за розтягу вздовж волокон – 6,2 МПа;
- за рівномірного відриву – 3,4 МПа;
- за нерівномірного відриву – 0,5 МПа;
- за зсуву при стиску – 8 МПа;
- те ж модифікованої деревини сосни – 16 МПа.

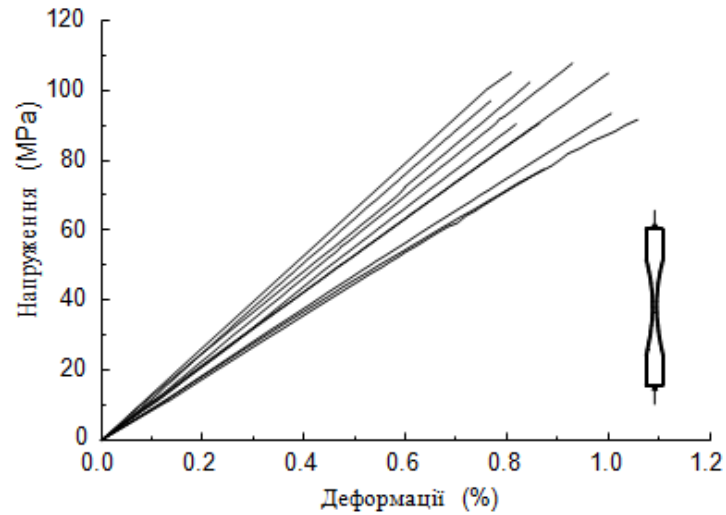
Експериментальні дослідження призм із суцільної клеєної деревини проводив Сасовський Т.А. [188]. Автор досліджував клеєні зразки сосни на

стиск вздовж волокон за короткочасного навантаження. Досліджувані призми мали розміри 45x45x250 мм. Кількість зразків, які піддавались дослідженню - 16 шт. Дані зразки виготовлялися шляхом випилювання з клеєних дерев'яних балок, які попередньо були виготовлені в заводських умовах. Призми випробовувались в гідравлічному пресі за стандартної вологості та температури. Деформації фіксувалися за допомогою тензодатчиків та індикаторів годинникового типу. За даними експериментальних досліджень автор побудував діаграми « σ - ϵ » за м'якого режиму випробувань. Усереднена міцність зразків із клеєної суцільної деревини складала 49 МПа.

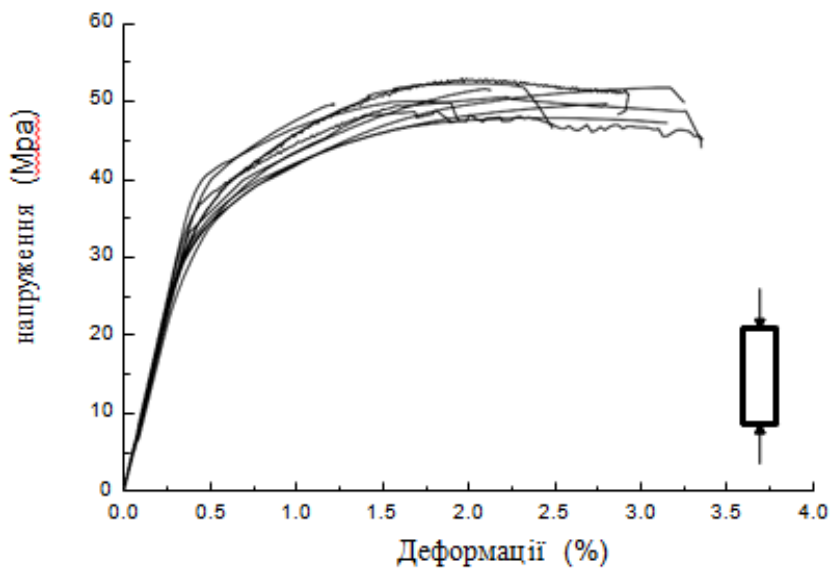
Zhou A., Bian Y., Shen Y., Huang D., Zhou M. [341] випробовували LB-композит виготовлений із смуг бамбука. П'ятирічний бамбук *Phyllostachys* із діаметром поперечного перерізу 100 мм, як правило, використовуються для виготовлення таких композиційних матеріалів. Стовбури розрізають на смуги довжиною приблизно 3 м, шириною 18 мм та товщиною 2 мм. Машина видаляє зовнішні та внутрішні частини бамбукових смуг. Зовнішня частина бамбука часто заповнена речовиною, що спричиняє труднощі при склеюванні. Внутрішня частина бамбука містить мало клітковини і, як така, має дуже низьку міцність. Це може сильно послабити міцність адгезії між двома смугами. Таким чином, зовнішні та внутрішні частини повинні бути видалені. Смуги сушать у печі при температурі приблизно 60 °C до тих пір, поки вміст вологи не стане менше 11%, а на смужки наносять фенольний клей. Смуги з нанесеним клеєм розташовують паралельно, утворюючи поверхню з плоских заготовок. Розміри плоских заготовок визначаються відповідно до виробничих цілей, а довжина може бути більшою, ніж довжина смуг, використовуючи спеціальну техніку з'єднання. Такий композит застосовують при виготовленні балок та колон.

Китайські дослідники проводили експериментальні дослідження конструкційних розмірів на стиск перерізом 50x50x200 мм та розтяг вздовж волокон. Експериментальні дослідження проводились згідно американських стандартів [248] за жорсткого режиму випробувань. Призми для досліджень

вирізувалась із LB-композиту. На основі проведеного експерименту вчені побудували діаграми «напруження-деформації» для стиску та розтягу вздовж волокон з обмеженням в точці граничних деформацій (рис.1.14).



(a) Експериментальні криві напружено-деформованого стану на розтяг



(b) Експериментальні криві напружено-деформованого стану на стиск

Рис.1.14. Діаграми «напруження-деформації» LB-композиту зі смуг бамбуку за короткочасного навантаження осьовому: а) розтягу; б) стиску.

1.10. Модифікована деревина

1.10.1. Способи модифікації деревини

Згідно [76, 77] наведемо основні поняття про модифікацію деревини.

Модифікація деревини – це процес спрямованої зміни фізико-механічних, теплофізичних, триботехнічних, біохімічних властивостей деревини з врахуванням подальших умов експлуатації виробів з неї.

Отже модифікована деревина – це деревина з поліпшеними фізико-механічними, теплофізичними, триботехнічними, біохімічними властивостями деревини, які отримані в процесі модифікації.

Способи модифікації деревини:

1) Термомеханічний спосіб модифікації деревини – це модифікація деревини попередньо нагрітої, пропареної, сухої чи наповненої деревини ущільненням з подальшим високо температурним висушуванням чи термообробкою.

2) Хіміко-механічний спосіб модифікації деревини – це модифікація деревини ущільненням з попередньою чи одночасною полімеризацією її аміаком або сечовиною чи просоченням смолами, маслами з подальшою термообробкою.

3) Термохімічний спосіб модифікації деревини – це модифікація деревини просочуванням мономерами, олігомерами або смолами з подальшою термообробкою з ціллю полімеризації чи поліконденсації в деревині просочуваного модифікатора.

4) Хімічний спосіб модифікації деревини – це модифікація деревини хімічною обробкою аміаком, оцтовим ангідридом чи катонами, які змінюють тонку структуру клітинних стінок чи хімічний склад деревини.

5) Радіаційно-хімічний спосіб модифікації деревини – це модифікація деревини просочуванням мономерами, олігомерами або смолами з подальшою їх полімеризацією під дією іонізуючого випромінювання.

1.10.2. Експериментальні дослідження модифікованої деревини

Проблемами модифікації деревини, способами, які застосовують при її модифікації, займалося велика кількість вітчизняних та закордонних вчених. Серед них – [16, 17, 23, 32, 33, 38, 69, 95, 105, 116, 117, 127, 128, 138, 142, 144-150, 159, 164, 167, 184, 189, 190, 212, 223, 225-230, 232-236, 240, 255, 258, 300, 301, 303, 317].

Розрізняють два види модифікації різними за походженням розчинами в тіло деревини – поверхнева та глибинна. Поверхневу модифікацію в основному проводять для захисту від загорання та враження комахами, грибами, шкідниками різних видів матеріалів, виробів, конструкцій з деревини, а також зміцнення та підсилення несучих конструкцій будинків, споруд, мостів і т.і. При цьому міцність конструкцій при поверхневій модифікації збільшується приблизно до 20-50 %. Глибинна модифікація, як правило, призначена для збільшення фізико-механічних характеристик матеріалів та виробів від 40%. Основним недоліком глибинної модифікації – велика трудомісткість робіт та затрат на її здійснення.

В останні роки широко почав застосовуватися фізико-хімічний спосіб модифікації деревини із застосуванням полімеризації різних модифікаторів під дією електричного, магнітного та електромагнітного поля, ультразвукових коливань. Такий спосіб модифікації знаходимо в роботах Хрулева В.М. [225-230], Сашина М.А. [189, 190] та ін.

Більш детально проаналізуємо роботи Машкина Н.А. [145-148], Сашина М.А. [189-190], Шамаева В.А. [234-236], які були виконані в останні роки.

Об'єктами дослідження Машкина Н.А. [145-148] були суцільна та модифікована деревина листяних (берези, осики, тополі) та хвойних порід (сосни), а також клеєна модифікована деревина. В якості модифікаторів деревини приймалися рідкі олігомери (різного хімічного складу фенолспирти) та мономери (стирол, метилметакрилат, фурфурол ацетоновий мономер). Для клеєної модифікованої деревини використовувалися карбамідні,

фенолформальдегідні та резорцинові клеї. Полімеризація проводилась термохімічним та хімічно-радіаційним способами модифікації.

Автор проводив експериментальні дослідження зразків модифікованої деревини під впливом різних агресивних та експлуатаційних середовищ за короткочасних та тривалих навантажень. Зокрема, дослідник піддавав впливу зразки водою на протязі 5-20 днів, сірчаною кислотою різної концентрації при різній температурі нагрівання. Машкин Н.В. також при випробуваннях визначав основні показники міцності, деформівності та повзучості модифікованої деревини. Автор прийшов до висновку, що модифікація деревини збільшує експлуатаційну надійність та довговічність композиційного матеріалу у 1,5-2 рази в порівнянні з суцільною деревиною, які піддавались різним впливам агресивного середовища. Також дослідник встановив, що композиційні матеріали мають набагато вищі показники міцності та деформівності в порівнянні зі зразками, які не піддавались модифікації, при роботі в агресивному середовищі. Автор досліджував не тільки модифікацію суцільної деревини, але й клеєної.

Вчений також просочував деревину під впливом електростатичного поля. Автор провів порівняння міцності модифікованих зразків, які були просочені в автоклаві під тиском та під дією електростатичного поля, та встановив, що основні показники міцності при цьому майже ідентичні. Також дослідник прийшов до висновку, що при просочуванні за допомогою електростатичного поля зменшується витрата модифікатора та час просочування.

Автор зауважив, що основні показники міцності та деформівності модифікованої деревини залежать від рівня просочування матеріалу у %, тобто чим вищий ступінь просочування, тим композиційний матеріал міцніший.

Також дослідник приводить доцільність використання не тільки глибинного просочування, але й поверхневого. При цьому не досягається максимальна міцність композиційного матеріалу, але зменшуються витрати на його модифікацію.

Машкин Н.А. запропонував теоретичну методику прогнозування довговічності модифікованої деревини під навантаженням, яка експлуатується в різних агресивних середовищах.

Сашин М.А. [189, 190] проводив експериментальні дослідження модифікованої деревини на основі сосни 1-го та 2-го сорту. В якості модифікатора були прийняті різні речовини за своїм хімічним складом, зокрема рідини – керосин, емукрил, емульсія 252 та тверді речовини – сірка, парафін. При цьому спосіб модифікації прийнятий в основному – хімічно-термічний. Отримані композиційні матеріали піддавалися впливу наступним агресивним середовищам – азотній, сірчаній, ортофосфорній, соляній кислотам; каустичній соді; машинному маслу; водопровідній та морській воді.

Зразки випробовувалися поперечним перерізом $20 \times 20 \times 20$ мм³ за короткочасного та тривалого навантаження. Проводилися наступні дослідження модифікованої деревини: на поперечний та поздовжній згин, на сколювання, на стиск поперек волокон. Також дослідник визначав ступінь деформативності отриманих композиційних матеріалів.

Автор в процесі досліджень підібрав оптимальні режими просочування деревини твердими та рідкими модифікаторами: парафіном – 60 хв при температурі 60⁰С; сіркою – 60 хв при температурі 130⁰С; керосином – 7 діб; емукрилом – 3 доби при кімнатній температурі. Також дослідник прийшов до висновку, що найбільший ефект дає модифікація емукрилом в порівнянні з іншими матеріалами.

В той же час вчений зазначає, що вплив агресивних середовищ негативно впливає на механічні властивості натуральної та модифікованої деревини. Найбільші втрати міцності досягаються при впливі сірчаної кислоти, найменші – машинного масла. Також автором досліджено вплив багаторазового замороження-розмороження таких матеріалів. Дослідник зазначив про негативний вплив на натуральну та модифіковану деревину такого агресивного середовища.

За результатами експериментальних досліджень Сашин М.А. прийшов до висновку, що модифікація призводить до стабілізації структури деревини.

Автор удосконалив математичну модель визначення довговічності та тривалої міцності деревини, яку розробив Иванов Ю.М. ще в 70-ті роки минулого століття.

Шамаев В.А. [234-236] досліджував модифіковану деревину отриману хіміко-механічним способом. В якості модифікатора приймався карбамід. Модифікації піддавалися наступні породи деревини: береза, осика, сосна.

Автор модифікував деревину за допомогою карбаміда як просочувального матеріалу з одночасним пресуванням деревини.

Дослідник піддавав композиційні зразки короткочасним навантаженням. Вчений визначив основні фізико-механічні та експлуатаційні властивості такого композиційного матеріалу. Зокрема такі механічні властивості як стиск вздовж та поперек волокон, твердість, ударну в'язкість, модуль пружності при стиску вздовж волокон та статичному згині. При цьому дослідник визначав міцнісні та деформативні параметри даного композиційного матеріалу. Також автор піддавав такі зразки і динамічним навантаженням. Провівши експериментальні дослідження, автор прийшов до висновку, що основні міцнісні характеристики збільшуються в 2-3 рази при модифікації деревини хімічно-механічним способом та просоченні карбамідом в порівнянні з натуральною деревиною.

Шамаев В.А. розробив та обґрунтував математичну модель пресування деревини. Автор також навів приклади застосування даного способу модифікації в різних галузях промисловості, зокрема виробництві підшипників ковзання, декоративних елементів меблів, покриття підлог, шпал для залізничних доріг та метрополітену.

Вагомий внесок в дослідження модифікованої деревини внесли і українські вчені, такі як Бехта П.А. [16, 17], Грабар І.Г [240], Горбачова О.Ю. [69, 167, 303], Пінчевська О.О. [167, 303], Цапко Ю.В. [127, 232, 233] та інші.

Пінчевська О.О. та Горбачова О.Ю. [69, 167, 303] проводили термічну модифікацію деревини граба та встановили міцнісні показники.

Інші українські дослідники, як правило, займалися питаннями модифікації виробів для меблевої промисловості та будівельних матеріалів.

Отже, приходимо до висновку, що глибинні способи модифікації деревини дають можливість сильніше поліпшувати фізико-механічні (міцнісні, деформативні) та експлуатаційні параметри листяних та хвойних порід деревини при виготовленні їх на різного роду деревообробних підприємствах. Але вони не дають можливості підвищити такі параметри, якщо деревина знаходиться вже в експлуатації у зв'язку з важким технологічним процесом модифікації. В такому випадку доцільно було б продовжувати експлуатаційну тривалість та надійність деревини, яка вже експлуатується, за допомогою поверхневої модифікації деревини різними речовинами. Більш детально такі види модифікації розглянемо в наступних розділах.

1.10.3. Речовини для модифікації деревини

Якість модифікації деревини, тобто підвищення її фізико-механічних властивостей, безпосередньо залежить від речовин, якими проводиться просочення деревини різних порід тим чи іншим способом модифікації. Є наступні види модифікаторів: фенолформальдегідні олігомери, сечовиноформальдегідні полімери, фенолальдегідні полімери, дисперсії полімерів, мономери (стирол, метилметакрилат, силор) та інші.

Проаналізуємо деякі з них.

Фенолформальдегідні олігомери легко проникають в мікроструктуру деревини, тому що вони є низько в'язкими речовинами. Ці речовини полімеризуються без каталізаторів та ініціаторів. Водночас мають досить довготривалу експлуатаційну надійність, а також підвищують фізико-механічні властивості деревини – міцність, біо- та вогнестійкість, стійкі до різних агресивних середовищ. Ці речовини є продуктами вторинної переробки при

фенолацетоновому виробництві надсмольних вод. Фенолформальдегідні олігомери є екологічно безпечними речовинами.

Сечовиноформальдегідні полімери – це суміш низько та високомолекулярних альдегідних сполук. Процес полімеризації проводять за температур 120 ... 130 °С. В якості каталізатора гарячого твердіння застосовують хлористий амоній. Для збільшення деяких фізико-механічних властивостей даний склад речовини модифікують спиртами або вводять в них фенол, фурфурол, меламін.

Фенолальдегідні полімери – це олігомери невеликої молекулярної маси, які легко проникають в мікроструктуру деревини, полімеризуються під дією тепла та хімічних каталізаторів. Недоліком таких речовин є усадка при твердінні, при цьому модифікована деревина стає досить крихкою. Щоб цього не трапилося фенолальдегідні полімери пластифікують.

Мономери – це низько молекулярні сполуки, які утворюють полімер під дією різних реакцій. Найбільш відомі мономери - стирол та метилметалокрилат. Полімеризація таких речовин проводиться за допомогою блочного методу при нагріванні. Недоліком таких модифікаторів є відсутність 100 % полімеризації. Тому в багатьох випадках для модифікації такими речовинами застосовують радіаційний або електромагнітний способи модифікації деревини.

1.11. Аналіз залежностей для побудови повних діаграм механічного стану деревини « σ_c - u_c »

Діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » для матеріалів описуються різними функціями.

В чинних нормах з проектування ДБН [87] вказується на необхідність враховувати пружно-пластичні властивості стиснутої деревини, але не наведено механізм їх отримання. Певною мірою їх можна отримати побудовою діаграми механічного стану деревини. Але крім того необхідно прийняти аналітичну

функцію для опису цього процесу. Розглянемо пропозиції, які існують на даний час щодо опису діаграм деформування деревини під навантаженням.

Для опису висхідної вітки даних діаграм можливо використати функцію, яку запропонував Saint-Venant A. [309] ще в середині XIX ст.

$$\sigma = A(1 - (1 - \frac{u}{u_1})^n). \quad (1.13)$$

В кінці XIX ст. Bach G. [249] запропонував наступну степеневу залежність

$$\sigma = A \cdot \sqrt[m]{u}. \quad (1.14)$$

В подальшому різними вченими було використано формулу Shule F. для апроксимації діаграми « σ_c - u_c »

$$\sigma = \alpha u^m - \beta u^2. \quad (1.15)$$

Також широко використовується функція запропонована Frank E.

$$\sigma = \alpha u / (1 + \beta u). \quad (1.16)$$

На початку XX ст. Baes L., Vandspere L. [250] отримали наступну математичну залежність

$$\sigma = f\eta(1 - u^{-mu}). \quad (1.17)$$

Один із самих відомих в радянські часи дослідником роботи деревини та дерев'яних конструкцій Белянкін Ф.П. [12-14] дав наступні пропозиції для апроксимації діаграм « σ_c - u_c », які в подальшому були використані багатьма вченими, отже:

– на ділянці від « $\sigma = \sigma_p$ » до « $\sigma = \sigma_c$ » залежність $\sigma(u)$ є прямолінійна і $\sigma = Eu$ (пружня робота матеріалу);

– потім деформації зростають від u_c до u_c^n при постійному напруженні $\sigma = \sigma_c^{n/n}$ (пластична робота).

Закордонні вчені G. Sturman, S. Shah, G. Winter [323] пропонують наступну математичну залежність

$$\sigma = \alpha u + \beta u^n. \quad (1.18)$$

За результатами експериментальних досліджень наведених в роботі [83, 84] побудована діаграма роботи сосни вздовж волокон. На ділянці діаграми від

0 до $\varphi=0,5$ залежність носить лінійний характер, іншу частину автор описує наступною залежністю

$$\varphi = 0,0203x^4 + 0,0322x^3 + 0,233x^2 + 0,889x - 0,620, \quad (1.19)$$

де $x = 1000$.

Для опису даних діаграм можливо використати наступну тригонометричну функцію запропоновану Everard N. [268]

$$\sigma = f \sin(\pi u / (2u_1)). \quad (1.20)$$

В роботах [15, 222] пропонуються наступні залежності для апроксимації діаграм « σ_c - u_c »

$$\frac{u}{u_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n; \quad (1.21)$$

$$\frac{u}{0,0032} = \frac{\sigma}{322} + 0,719 \left(\frac{\sigma}{322} \right)^{12,07}. \quad (1.22)$$

В середині ХХ ст. закордонні дослідники Sinha В.Р., Gestle К.Н., Tulin L.G. [314, 315] пропонують таку математичну функцію

$$\sigma = \alpha u / (\alpha + (\beta u)^b). \quad (1.23)$$

Рафаїлов А.Г. [177] запропонував наступну залежність на основі проведених експериментальних досліджень малих зразків перерізом 20x20x30 мм

$$\sigma = A_0 u \sum_{i=1}^N A_i \lg^{i-1} u. \quad (1.24)$$

Вареник А.С. [27] встановив емпіричні залежності між напруженнями та деформаціями, зокрема для деревини сосни

$$\sigma_c = 122600 \cdot u_c - 883 \cdot 10^6 \cdot u_c^3, \text{ кгс/см}^2, \quad (1.25)$$

– для деревини ялини

$$\sigma_c = 139200 \cdot u_c - 1301 \cdot 10^6 \cdot u_c^3, \text{ кгс/см}^2, \quad (1.26)$$

Eurocode [267] пропонує таку математичну функцію

$$\sigma_c = f_{c,0,d} \left(1 - \left(1 - \frac{u_c}{u_{c,0,d}} \right)^n \right). \quad (1.27)$$

Ромашко В.М. [180] дещо удосконалив функцію (1.27) та пропонує її записувати у вигляді

$$\sigma_c = \frac{E_0 \cdot u_c - f_{c,0,d} \cdot \left(\frac{u_c}{u_{c,0,d}} \right)}{1 + \left(\frac{E_0}{f_{c,0,d}} - \frac{2}{u_{c,0,d}} \right)}. \quad (1.28)$$

В останні роки широку популярність опису діаграм « σ_c – u_c » для деревини завоювали поліноміальні залежності, які дають хорошу збіжність експериментальних та теоретичних значень. Наведемо деякі з них.

Герстнер Ф.И. в середині ХІХ ст. запропонував функцію

$$\sigma = A_1 u - A_2 u^2. \quad (1.29)$$

Залежність (1.29) в подальшому в своїх роботах використав Пятикрестовский К.П. [174, 175], розписуючи при цьому коефіцієнти A_1 та A_2

$$\sigma_c = E_0 \cdot u_c - \frac{E_0^2}{4 \cdot f_{c,0,d}} \cdot u_c^2. \quad (1.30)$$

Zhou A., Bian Y., Shen Y., Huang D., Zhou M. [341] пропонують описувати діаграму «напруження–деформації» клеєної деревини на основі бамбука наступною поліноміальною функцією

$$\sigma_c = \lambda_1 u_c^2 + \lambda_2 u_c + \lambda_3. \quad (1.31)$$

Поліном 3-го ступеня був запропонований Быковим В.В. [24] та Гринкруг Н.В. [81] для опису діаграм «напруження–деформації» деревини

$$\sigma = A_1 u + A_2 u^2 + A_3 u^3. \quad (1.32)$$

В роботі [139] використано рівняння кубічної параболи

$$\sigma = A_1 u - A_2 u^3. \quad (1.33)$$

Вареник К.А. [28, 29] отримав експериментальним шляхом повні діаграми деревини стиску вздовж волокон зі спадною віткою та підтвердив збіжність результатів поліноміальними залежностями (1.32) та наступними функціями

$$\sigma = A_1 u + A_2 u^2; \quad (1.34)$$

$$\sigma = A_1 u + A_2 u^3. \quad (1.35)$$

Автор прийшов до висновку, що найбільшу збіжність між експериментальними та теоретичними значеннями забезпечує формула (1.35).

Також для побудови діаграми «напруження-деформації» можливо використання полінома 5-го степеня [11]

$$\sigma = f_c \sum_{i=1}^5 a_i \left(\frac{u_c}{u_{c_1}} \right)^i. \quad (1.36)$$

Провівши аналіз наведених залежностей, приходимо до висновку, що для опису діаграм «напруження–деформації» дійсного стану деревини та композиційних матеріалів на її основі зі спадною віткою на стиск вздовж волокон найбільшу збіжність експериментальних та теоретичних значень мають поліноміальні залежності. В наступних розділах буде проведено апроксимацію повних діаграм механічного стану деревини та її композитів (клеєна та модифікована деревина) листяних та хвойних порід деревини та наведена збіжність з експериментальними даними.

1.12. Висновки до першого розділу

1. Проведено детальний аналіз стану експериментально-теоретичних досліджень суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі.

2. Встановлено, що проведено величезна кількість досліджень за роботи суцільної деревини за м'якого режиму прикладання навантаження (за приростом навантажень) за короткочасного осьового стиску вздовж волокон на зразках чистої деревини, і практично відсутні дослідження, що стосуються роботи суцільної, клеєної, модифікованої деревини за жорсткого випробування

(за приростом переміщень), окрім досліджень Тутурина С.В., Вареника К.А., Da Silva A., Kyrakides S., Zhou A., Bian Y., Shen Y., Huang D., Zhou M. Відсутні такі дослідження для дерев листяних порід – берези, вільхи, ясена та хвойних – модрина, ялини.

3. Фактично відсутні побудовані повні діаграми деформування матеріалу «напруження σ_c – деформації u_c » від початку завантаження до руйнування (висхідна та спадна вітки), окрім зазначених вище авторів, та відсутні апроксимуючі функції таких діаграм.

4. В науковій літературі зустрічається невелика кількість праць, що стосується впливу вологості, віку та швидкості деформування зразків на основні міцнісні та деформівні властивості таких матеріалів.

5. Відсутні методики з визначення критичних та граничних деформацій, модуля деформацій (січного) суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі з врахуванням пружно-пластичності.

6. Невелика кількість досліджень, що стосується поверхневої та глибинної модифікації деревини листяних та хвойних порід, які б давали змогу продовжувати тривалість їх експлуатації (матеріалів, деталей, виробів, елементів, конструкцій) та підсилення без розвантаження.

7. Відсутній загальний алгоритм поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини від зрубу до проведення процесу висушування, склеювання, модифікації.

Матеріали розділу 1 наведені в наступних працях [40–48, 53–55, 57–68, 272–276, 337, 338].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТА ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Вибір розмірів зразків

У зв'язку з тим, що структура деревини є анізотропною та неоднорідною, то необхідність врахування цих чинників при експериментальних дослідженнях є обов'язковою. В розділі 1 було детально проаналізовано будову і склад деревини. Також говорили про те, що важливим чинником впливу на роботу деревини за різних навантажень є розміри поперечного перерізу.

В середині минулого століття в СРСР вийшли перші нормативні документи, в яких розрахункові величини були отримані на основі випробувань малих зразків чистої деревини перерізом 20x20x30 мм. Одним з перших, хто наполягав на проведенні випробувань на однакових за розмірами зразках був професор Иванов Ю.М. І такий переріз зразків був прийнятий та існує донині в нас і в більшості країн Європи, окрім Великобританії. В США та Канаді для отримання фізико-механічних характеристик прийняті призми конструкційних розмірів 51x51x210 мм. Ми бачимо, що об'єм таких зразків значно перевищує переріз малих зразків з чистої деревини. А враховуючи той факт, що розрахункові величини міцності та деформівності застосовуються для розрахунку елементів та конструкцій набагато більших розмірів ніж призми 20x20x30 мм, то є певний сумнів у тому, що і мікро- та макроструктура деревини в повній мірі задіяна в перерізі малих зразків. І, звичайно, впливає на адекватність самих результатів, на відміну від призм конструкційних розмірів.

Аналізуючи роботи Свеницкого Г.В. [191], Знаменского Е.М. [104], Соболева Ю.С. [200], Леонтьева Н.Л. [136], Вольнского [34], Тутурина С.В. [210, 211, 238], Сасовського Т.А. [187], Вареника К.А. [27-29], Быкова В.В. [24], Zhou A., Bian Y., Shen Y., Huang D., Zhou M. [341] та стандарти США, Канади [248, 249], Великобританії приходимо до висновку, що зразки для

експериментальних досліджень повинні бути конструктивних розмірів. Мінімальним може слугувати переріз 30x30 мм, максимальним – 70x70 мм. Співвідношення висоти до розмірів перерізу може бути в межах (1/4...1/7) для запобігання впливу тертя на міцність деревини в місці опирання між плитою пресу та зразком.

Враховуючи вище наведене, а також наявність випробувальної машини СТМ-100 в лабораторії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, яка може створити навантаження до 100 кН, то найбільш придатним зразком при випробуваннях на повздовжній стиск може слугувати призма 30x30x120 мм. Призма таких розмірів в повній мірі дозволить врахувати мікро- та макроструктуру деревини. Також прийнятий зразок такого розміру може слугувати і для композиційних матеріалів, зокрема для модифікованих та клеєних, щоб в подальшому можливо було порівняти основні міцнісні та деформівні характеристики (початковий модуль пружності, модуль деформацій (січний модуль), максимальні напруження, критичні, граничні та остаточні деформації) всіх матеріалів з порід деревини, що досліджувалися в даній роботі.

2.2. Вибір деревини для випробувань

Вибір порід деревини було зумовлено декількома факторами. Зокрема першим і найважливішим – це є область застосування вихідного матеріалу в різних галузях народного господарства. Також при виборі враховувались різні фізико-механічні показники: твердість, міцність, початковий модуль пружності, густина та багато інших. Так як в експерименті викикористовувалася деревина різного віку – 20, 40, 60 років, то найбільш складним завданням було знайти такі різновікові породи на окремих лісових ділянках. Але цю проблему було також успішно вирішено. Зразки для випробувань були знайдені в різних районах та лісництвах Західної України.

Хвойна деревина легко обробляється, при відносно невеликій густині має достатню міцність, а при атмосферних впливах «висушування-набрякання» має достатню високу стійкість протидії виникненню усадкових тріщин. Листяна деревина має більш складну будову і в багатьох випадках характеризується більшими природними дефектами та пошкодженнями.

Отже, для експериментально-теоретичних досліджень були вибрані породи з вище наведеними показниками, зокрема листяні - береза, вільха, ясен; хвойні – сосна, ялина, модрина.

Наведемо основні властивості та характеристики тих порід деревини, які будемо використовувати в подальших експериментальних дослідженнях [22, 26, 213, 331].

Листяні породи.

Береза - без'ядрова порода (рис.2.1а). Деревина біла з жовтуватим або червонуватим відтінком. Річні кільця погано помітні, серцевинні промені видно лише на строго радіальних розрізах. Для деревини берези характерні порівняно висока міцність, твердість, ударна в'язкість, але досить низька стійкість до гниття.

Вільха - без'ядрова порода (рис.2.1б). Деревина її білого кольору, але на повітрі набуває красивого червонувато-бурого відтінку. Річні кільця помітні слабо, судин не видно. Рідкісні широкі серцевинні промені видно на всіх розрізах. Часто зустрічаються серцевинні повторення. Деревина у вільхи м'яка, однорідна за будовою.

Ясен - ядрова порода з білою, злегка жовтуватою або рожевою заболонню і ясно-бурым ядром (рис.2.1в). На поперечному розрізі в пізній деревині скупчення дрібних судин і паренхім утворюють хаотично розташовані білі крапки або рисочки. Річні кільця добре видно, серцевинні промені практично непомітні. Деревина ясена за своїми властивостями близька до деревини дуба, тому і область її застосування приблизно така ж. Деревина ясена має високу міцність та ударну в'язкість, добре гнеться.



а

б

в

Рис. 2.1. Древа листяних порід: а) береза; б) вільха; в) ясен

Хвойні породи.

Модрина (рис.2.2а) має ядро червонувато-бурого кольору, добре видимі річні кільця з чіткою внутрішньою межею між ранньою і пізньою деревиною, нечисленні і дрібні смоляні ходи, деревина мало сучковата, володіє високими щільністю і міцністю, стійкістю до гниття, має гарну текстуру. Деревина модрини легко розтріскується при сушінні, розколюється, важче інших хвойних порід обробляється на верстатах.

Сосна (рис.2.2б) має злегка рожеве ядро, яке з часом стає буро-червоним, широку заболонь різних кольорів (віджовтуватого до рожевого), добре видимі річні кільця з досить чіткою межею між ранньою і пізньою деревиною, досить великі і численні смоляні ходи. Деревина характеризується середньою щільністю, досить високими міцністю і стійкістю до гниття, добре обробляється.

Ялина (рис.2.2в) - без'ядрова порода. Деревина ялини біла із слабким жовтуватим та розовуватим відтінком. Річні кільця добре помітні, смоляні ходи нечисленні і дрібні. За міцністю, густиною та стійкістю до гниття ялина дещо поступається сосні. Крім того, вона важче обробляється через велику кількість сучків і підвищену твердість. Проте деревина ялини однорідна за будовою, малосмолиста, має стійкий білий колір, довгі волокна.

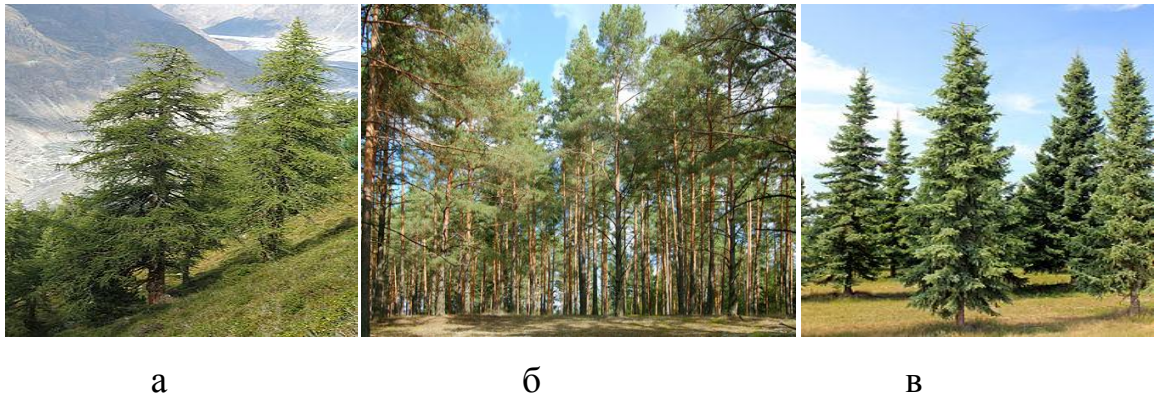


Рис.2.2. Дерева хвойних порід: а) модрина; б) сосна; в) ялина

2.3. Виготовлення дослідних зразків

Для вирішення поставлених задач було виготовлено 4 серії зразків з першого сорту різних порід суцільної, клеєної, модифікованої деревини перерізом 30x30x120 мм та клеєної і модифікованої клеєної деревини сосни 45x45x250 мм.

2.4. Силowe обладнання для проведення експерименту

Експериментальні дослідження клеєної деревини сосни модифікованої силором здійснювали за м'якого режиму випробувань на установці ричажного типу в лабораторії Національного університету водного господарства та природокористування, інші дослідження - за жорсткого режиму проведені в стінах Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Фізико-механічні характеристики деревини на повздовжній стиск визначали шляхом випробування призм розміром 45x45x250 мм за м'якого режиму прикладення короткочасного одноразового навантаження на машині УИМ-50 (з ціною поділки 1 кН і діапазоном вимірювання 500 кН).

Машина характеризується великою ходою траверси і широким діапазоном швидкостей випробування, що при індивідуальній комплектації машини

змінними захватами і оснащенням, забезпечує вирішення широкого кола завдань контролю якості у промисловості (рис.2.3).

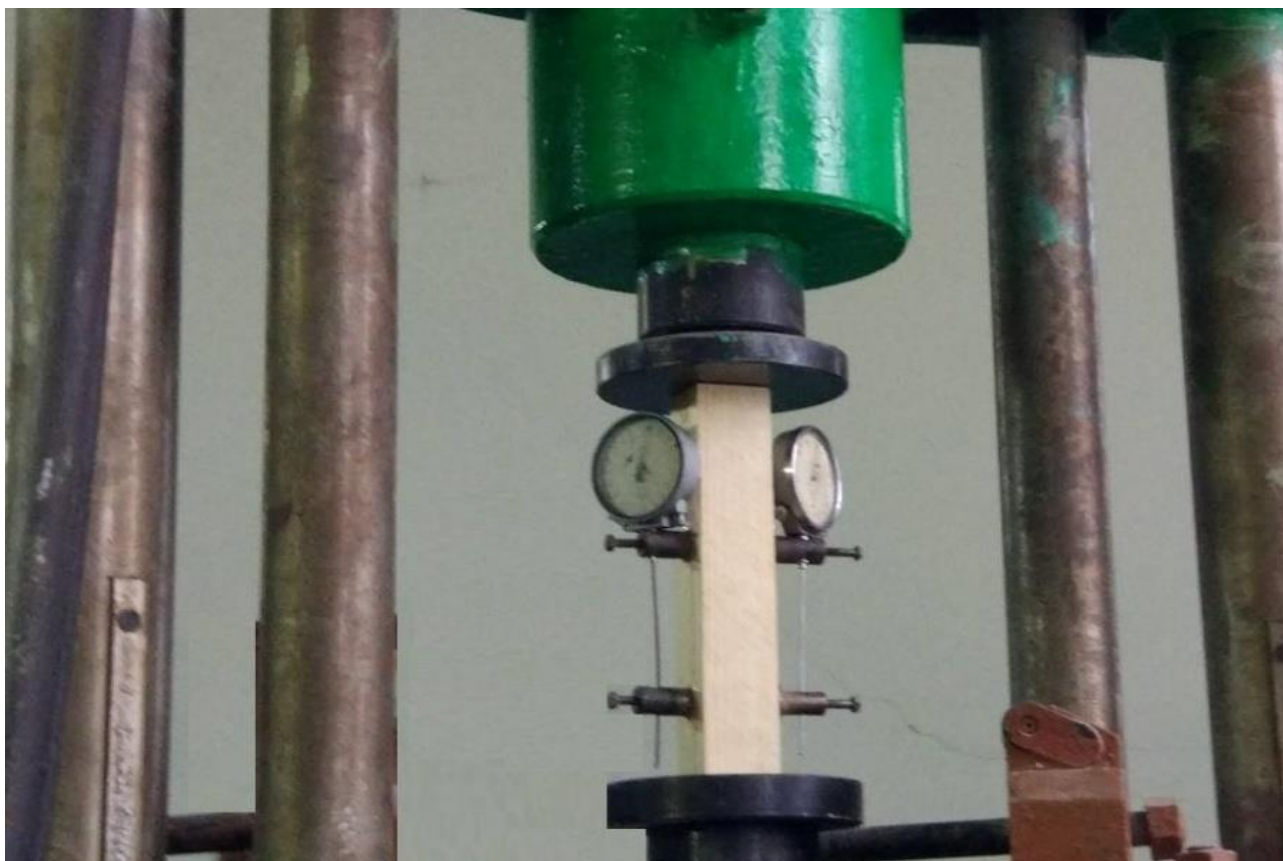


Рис.2.3. Випробувальна машина УИМ-50

Випробування зразків з деревини та композиційних матеріалів на її основі за жорсткого режиму прикладення короточасного одноразового навантаження проводили на універсальній сучасній сервогідролічній випробувальній машині СТМ-100 [246, 335, 336]. Управління процесом випробувань здійснюється з комп'ютера (рис.2.4 та рис.2.5).

Захист від перевантажень і найбільш поширених помилок оператора закладені в програмному забезпеченні. Для захисту функціональних вузлів випробувальної машини на рамі встановлені обмежувачі ходу траверси і кнопка екстреної зупинки.

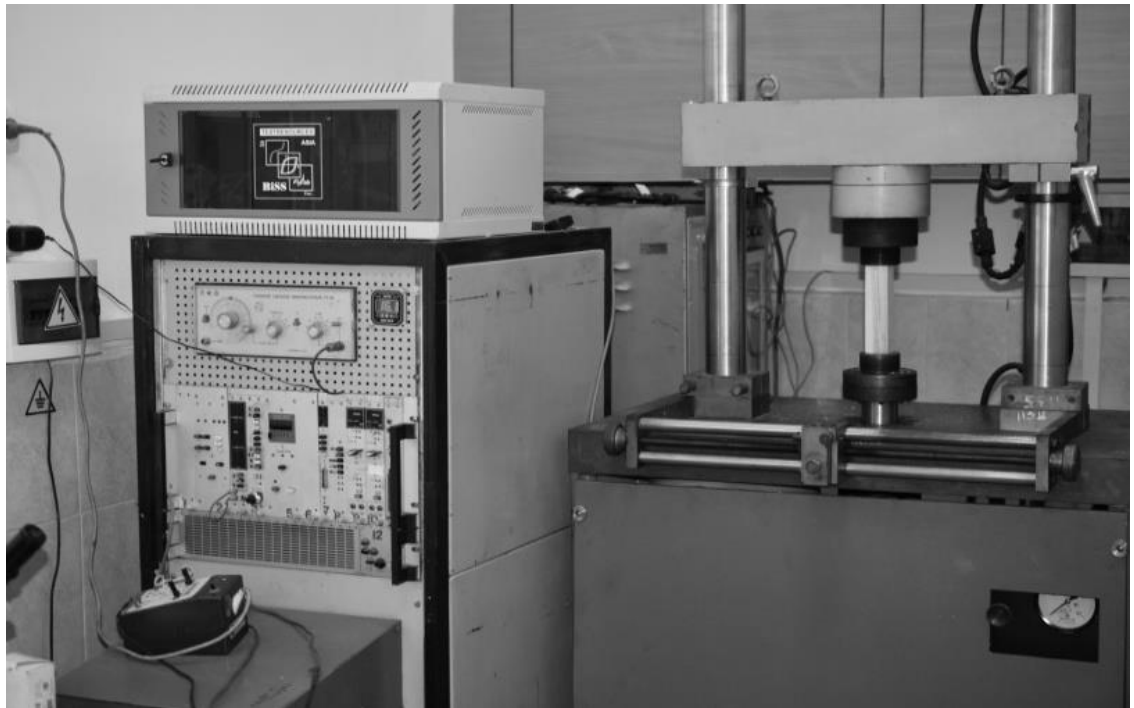


Рис.2.4. Сервогідралічна випробувальна машина STM-100

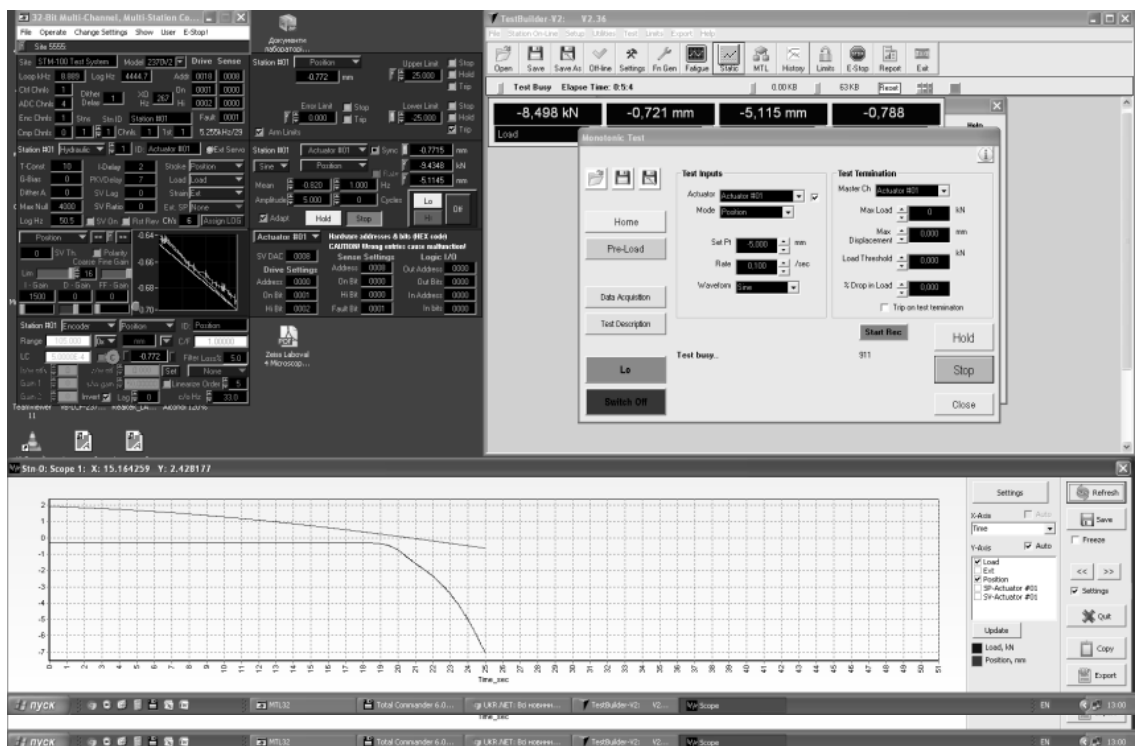


Рис.2.5 Інтерфейс з програмним забезпеченням

Інструментарій програми містить стандартну бібліотеку методів випробувань згідно нормативної документації. За попереднім погодженням з замовником можливе розширення стандартної бібліотеки необхідними для

роботи стандартами чи встановлення додаткового модуля програмного забезпечення. Технічні характеристики випробувальної машини СТМ-100 наведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики випробувальної машини СТМ-100

Максимальне навантаження, кН	100
Клас точності тензодатчика	0,5
Діапазон вимірювань,	від 400Н до 100кН
Точність переміщення траверси, мкм	0,015
Повторюваність переміщення, мкм	1
Діапазон вимірювання деформації, %	2-100
Точність вимірювання деформації, %	±0,2
Діапазон швидкості переміщення траверси, мм/хв	0,0005...1000
Максимальне переміщення траверси на розтяг, мм	600
Максимальне переміщення траверси на стиск, мм	600
Частота дискретизації, кГц	1
Розрядність цифрових перетворювачів, біт	24
Тензодатчик, номінальна сила, кН	100
Затискачі	клиновий тип
Габаритні розміри, мм	1010×750×2210
Вага випробувальної машини, кг	1100
Напруга живлення, В	380

2.5. Програма та об'єм експериментальних досліджень

Програмою експериментальних досліджень передбачено виявлення та вивчення впливу одноразових короткочасних навантажень за м'якого та жорсткого режиму навантаження на міцнісні та деформівні характеристики

механічних властивостей суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі за осьового стиску вздовж волокон, а також побудова повних діаграм деформування «напруження–деформації» таких зразків.

Для досягнення поставленої мети в лабораторії кафедри будівельної механіки Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та лабораторії кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природокористування було проведено експериментальні дослідження 4 серій зразків.

2.5.1. Перша серія випробувань. Дослідження суцільної деревини

Першою серією досліджень передбачено експериментальні випробування 1 сорту конструкційних розмірів суцільної деревини листяних (берези, вільхи, ясеня) та хвойних (модрина, сосна, ялина) різного віку, вологості та швидкості деформування за жорсткого режиму випробувань осьовим стиском вздовж волокон перерізом 30x30x120 мм.

Особливості виготовлення дослідних зразків. Для вирішення поставлених задач було виготовлено серію зразків 1 сорту суцільної деревини конструкційних розмірів різних порід у вигляді призм перерізом 30x30x120 мм (рис.2.6.). Дані розміри призм дозволяють враховувати мікро- та макроструктуру деревини та забезпечують відсутність впливу тертя між плитою пресу та торцем зразка. Отже, для випробувань вибрані наступні породи деревини: хвойні породи – модрина, сосна, ялина; листяні – береза, вільха, ясен. Дерева, з яких виготовлені зразки, були вирощені, зокрема, сосна, ялина - в лісах Рівненської області; береза, вільха, ясен – в лісах Волинської області; модрина – в лісах Івано-Франківської області.

Однією із самих більших проблем, які постали перед нами – це знаходження дерев різного віку однієї породи, які вирощені в одному лісництві (районі). Це необхідно для порівняння механічних характеристик

досліджуваної деревини, тому що одна і та ж порода деревини, яка вирощена в різних районах може мати різні характеристики. Але, на щастя, ця проблема була вирішена.

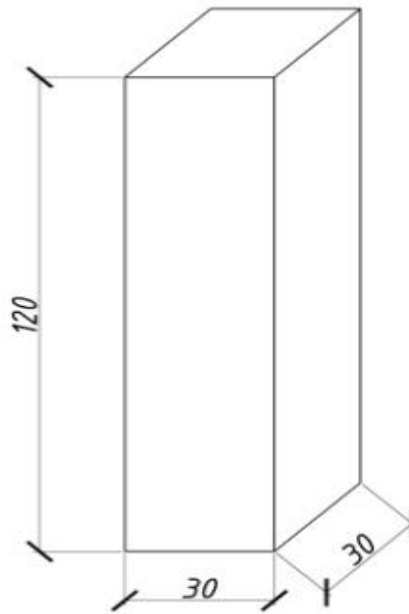


Рис.2.6. Геометричні розміри зразків із суцільної деревини

Отже, для експериментальних досліджень були вибрані дерева віком 20 ± 2 , 40 ± 3 , 60 ± 5 років.

Для виготовлення зразків, згідно діючих стандартів [96, 99–103], вибирали дерево з рівним стовбуром та з малою кількістю віток. Це дозволило нам зменшити сучкуватість деревини та збільшити паралельність самих волокон.

Після зрізу вибраних дерев стовбури транспортувались до столярних цехів та розрізались на бруси. Проводилось маркування отриманих елементів.

Деревина, яка піддавалась випробуванню мала вологість: 30%, 21%, 12%. Заготовки деревини попередньо висушували в лабораторних умовах до усередненої вологості $30 \pm 1\%$ за температури 20°C і вологості приблизно 65% та у спеціальних сушильних камерах до вологості відповідно $21 \pm 1\%$ та $12 \pm 1\%$. Вологість деревини контролювалась за допомогою вологоміра MD-814 (рис.2.7) [98]. Зразки випилювали із заздалегідь заготовлених довгих

брусків. Кожен із отриманих зразків, як і вимагається, був без видимих дефектів [96, 99]. Якщо дана умова не виконувалась, то призми вибраковувались.



Рис.2.7. Вологомір MD-814

Окремо декілька слів скажемо про сушіння деревини та визначення її вологості. Для висушування в лабораторних умовах бруси складали штабелями та перекладалися планками для всебічного кондиціювання. Висушування до вологості 30% тривало декілька тижнів. Іншу частину брусів доводили до необхідної вологості (21% та 12%) в сушильних камерах за відповідної температури згідно діючих стандартів [96].

Ми вже говорили, що вологість вимірювали за допомогою голчастого портативного вологоміра MD-814 китайського виробництва (Рис.2.7). Він вимірює вологість різних порід деревини в межах $5 \dots 40 \pm 1\%$. Робоча температура $0 \dots 40^{\circ}\text{C}$. В основу роботи приладу покладено діелькометричний метод вимірювання вологості. Для застосування вологоміра необхідно зняти захисний ковпачок і встромити електроди в досліджуваний зразок деревини. Зміна породи здійснюється за допомогою спеціального перемикача. Результати вимірювань одразу фіксуються на великому і зручному LCD дисплеї та зберігаються в пам'яті приладу. Вологомір має зручні змінні голкоподібні електроди.

Обсяг експериментальних досліджень першої серії випробувань наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Обсяг експериментальних досліджень суцільної деревини

№ _{п/п}	Порода деревини	Шифр зразка	Вологість, %	Вік, років	Швидкість завантаження, мм/хв	Кількість зразків, шт.
1	Береза	БС-30-60-1,5	30	60	1,5	6
2	Береза	БС-21-60-1,5	21	60	1,5	6
3	Береза	БС-12-60-1,5	12	60	1,5	9
4	Береза	БС-12-40-1,5	12	40	1,5	6
5	Береза	БС-12-20-1,5	12	20	1,5	6
6	Береза	БС-12-60-3,0	12	60	3,0	6
7	Береза	БС-12-60-4,5	12	60	4,5	6
8	Вільха	ВС-30-60-1,5	30	60	1,5	6
9	Вільха	ВС-21-60-1,5	21	60	1,5	6
10	Вільха	ВС-12-60-1,5	12	60	1,5	9
11	Вільха	ВС-12-40-1,5	12	40	1,5	6
12	Вільха	ВС-12-20-1,5	12	20	1,5	6
13	Вільха	ВС-12-60-3,0	12	60	3,0	6
14	Вільха	ВС-12-60-4,5	12	60	4,5	6
15	Ясен	ЯсС-30-60-1,5	30	60	1,5	6
16	Ясен	ЯсС-21-60-1,5	21	60	1,5	6
17	Ясен	ЯсС-12-60-1,5	12	60	1,5	9
18	Ясен	ЯсС-12-40-1,5	12	40	1,5	6
19	Ясен	ЯсС-12-20-1,5	12	20	1,5	6
20	Ясен	ЯсС-12-60-3,0	12	60	3,0	6
21	Ясен	ЯсС-12-60-4,5	12	60	4,5	6

Продовження таблиці 2.1.

22	Модрина	МС-30-60-1,5	30	60	1,5	6
23	Модрина	МС-21-60-1,5	21	60	1,5	6
24	Модрина	МС-12-60-1,5	12	60	1,5	9
25	Модрина	МС-12-40-1,5	12	40	1,5	6
26	Модрина	МС-12-20-1,5	12	20	1,5	6
27	Модрина	МС-12-60-3,0	12	60	3,0	6
28	Модрина	МС-12-60-4,5	12	60	4,5	6
29	Сосна	СС-30-60-1,5	30	60	1,5	6
30	Сосна	СС-21-60-1,5	21	60	1,5	6
31	Сосна	СС-12-60-1,5	12	60	1,5	9
32	Сосна	СС-12-40-1,5	12	40	1,5	6
33	Сосна	СС-12-20-1,5	12	20	1,5	6
34	Сосна	СС-12-60-3,0	12	60	3,0	6
35	Сосна	СС-12-60-4,5	12	60	4,5	6
36	Ялина	ЯлС-30-60-1,5	30	60	1,5	6
37	Ялина	ЯлС-21-60-1,5	21	60	1,5	6
38	Ялина	ЯлС-12-60-1,5	12	60	1,5	9
39	Ялина	ЯлС-12-40-1,5	12	40	1,5	6
40	Ялина	ЯлС-12-20-1,5	12	20	1,5	6
41	Ялина	ЯлС-12-60-3,0	12	60	3,0	6
42	Ялина	ЯлС-12-60-4,5	12	60	4,5	6

Маркування зразків БС-30-60-1,5: Б-береза; С – суцільна деревина; 30 – вологістю 30%; 60 – вік деревини 60 років; 1,5 – швидкість деформування 1,5 мм/хв.

Загальна кількість випробуваних зразків суцільної деревини всіх досліджуваних порід першої серії склала 270 шт.

2.5.2. Друга серія випробувань. Дослідження клеєної деревини

Другою серією випробувань передбачено експериментальні випробування клеєної деревини листяних (берези, вільхи, ясена) та хвойних (модрина, сосни, ялини) за жорсткого режиму випробувань осьовим стиском вздовж волокон перерізом 30x30x120 мм. Вологість всіх зразків становила 12%, вік деревини 60 років, швидкість деформування досліджуваних призм була однаковою та становила 1,5 мм/хв.

Особливості виготовлення дослідних зразків. Процес виготовлення зразків другої серії до певного моменту нічим не відрізнявся від першої. Після висушування в термічних камерах і досягання елементів усередненої стандартної вологості бруси всіх досліджуваних порід розрізалися на дошки. Після чого проводилось їх стругання. Стругані дошки мали переріз 10x40 мм довжиною 100 см. Дошки були склеєні по пласту між собою з використанням резорцинового клею Casco Silva, класу вологостійкості D3 відповідно EN204/205. Дощатоклеєні дерев'яні балочки виготовлялися в заводських умовах.

Для досягнення хорошої міцності клейових з'єднань дотримувалися такого режиму склеювання. Вологість заготовок була в межах $12 \pm 1\%$, клас шорсткості поверхні деревини – не нижче 8-го [97]. Температура заготовок перед склеюванням була в межах 16 – 18 °С. Клей наносили рівним шаром товщиною 0,1 – 0,15 мм за допомогою валика. Витрата резорцинового клею становила 0,2 кг/м² поверхні, що склеювалася. В'язкість клею визначали за допомогою віскозиметра, яким вимірювали час витікання (в секундах) 100 см³ клею при температурі 20⁰С. Після нанесення клею на обидві поверхні дошки-заготовки та складання їх в пакет (три дошки товщиною 10 мм) проводилось стискання струбцинами на відстані 15см одна від одної. При склеюванні, дошки в пакет складалися так, щоб напрямок волокон співпадав. На кожну балочку наносилось маркування.

Тривалість витримування пакету в пресованому стані становила 12 годин. Після чого ще витримували 48 годин після пресування до завершення повного процесу твердіння. При склеюванні деревини температура в приміщенні становила 20°C , а вологість повітря навколишнього середовища була в межах $65\pm 5\%$.

Після повного процесу склеювання бокові поверхні клеєної балочки оброблялися на фугувальному станку для отримання проектного розрахункового перерізу 30×30 мм. Вирізання зразків призм довжиною 120 мм для даної серії випробувань проводили з однієї балки для кожної окремо взятої породи деревини. Прийнята довжина призм (рис.2.8) дала можливість уникнути впливу тертя між плитою випробувальної машини та торцями зразків на міцність матеріалу.

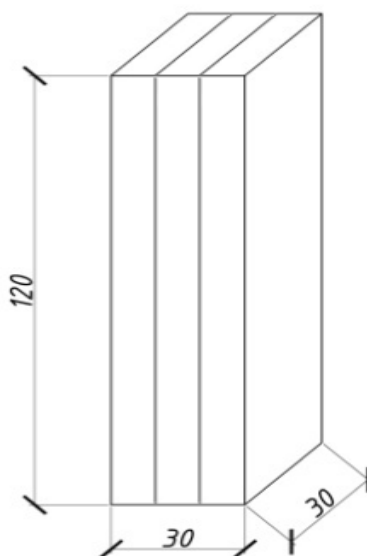


Рис.2.8. Геометричні розміри зразків клеєної деревини

Обсяг експериментальних випробувань другої серії наведено в табл. 2.2.

Обсяг експериментальних досліджень клеєної деревини

№ _{п/п}	Порода деревини	Шифр зразка	Вид клею	Кількість зразків, шт.
1	Береза	БК-Р	Резорциновий	6
2	Вільха	ВК-Р	Резорциновий	6
3	Ясен	ЯсК-Р	Резорциновий	6
4	Модрина	МК-Р	Резорциновий	6
5	Сосна	СК-Р	Резорциновий	6
6	Ялина	ЯлК-Р	Резорциновий	6

Маркування зразків СК-Р: С-сосна; К – клеєна деревина; Р – склеєна резорциновим клеєм.

Загальна кількість випробуваних зразків клеєної деревини всіх досліджуваних порід другої серії склала 36 шт.

Крім дослідження деревини за осьового вздовж волокон стиску зразків були проведені дослідження міцності клейових з'єднань соснових дошок.

2.5.3. Третя серія випробувань. Дослідження клеєної та клеєної модифікованої деревини сосни

Третьою серією випробувань передбачено експериментальні випробування клеєної та клеєної модифікованої деревини сосни, яка була просочена полімерною композицією «силор» за поверхневої модифікації, та досліджувалася за м'якого режиму прикладення зовнішнього навантаження. Дослідження проводилися за осьового вздовж волокон стиску зразків розмірами 45x45x250 мм (рис.2.9). Вологість всіх зразків до модифікації була 12%, вік деревини на момент заготовки лісового матеріалу був 85 років.

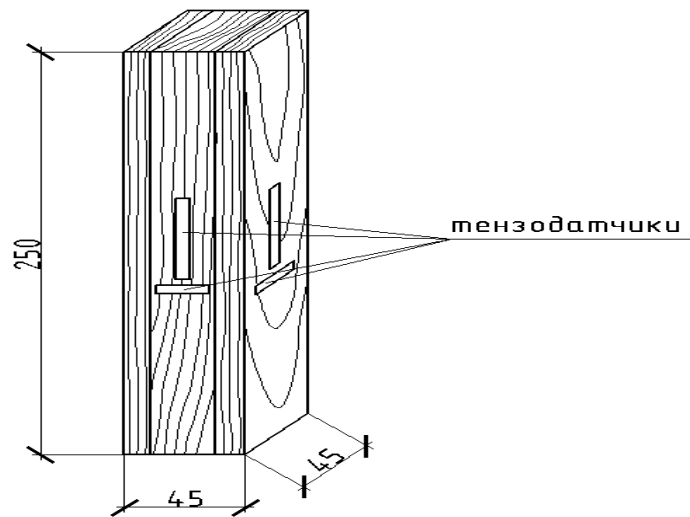


Рис.2.9. Геометричні розміри зразків клеєної та клеєної модифікованої деревини сосни

Обсяг експериментальних досліджень третьої серії випробувань наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3.

Обсяг експериментальних досліджень клеєної та клеєної модифікованої деревини сосни

№ _{п/п}	Порода деревини	Шифр зразка	Вид клею	Спосіб модифікації	Термін просочення, хв	Кількість зразків, шт.
1	Сосна	ПС-0	Резорц	-	-	5
2	Сосна	ПС-15	Резорц	Поверхневий	15	5
3	Сосна	ПС-30	Резорц	Поверхневий	30	5
4	Сосна	ПС-60	Резорц	Поверхневий	60	5
5	Сосна	ПС-120	Резорц	Поверхневий	120	5
6	Сосна	ПС-240	Резорц	Поверхневий	240	5
7	Сосна	ПС-360	Резорц	Поверхневий	360	5
8	Сосна	ПС-720	Резорц	Поверхневий	720	5

Маркування зразків, наприклад ПС-15 треба читати наступним чином: П – поверхнева модифікація; С – сосна клеєна; 15 – термін просочення 15 хв.

Загальна кількість випробуваних зразків клеєної деревини всіх досліджуваних порід четвертої серії склала 40 шт.

2.5.4. Четверта серія випробувань. Дослідження модифікованої суцільної деревини

Четвертою серією випробувань передбачено експериментальні випробування суцільної деревини листяних (берези, вільхи, ясена) та хвойних (модрини, сосни, ялини), які модифіковані полімерною композицією «силор» за поверхневої та глибинної модифікації. Експериментальні дослідження проводилися за жорсткого режиму випробувань осьовим стиском вздовж волокон на зразках розмірами 30x30x120 мм. Вологість всіх зразків до модифікації складала 12%, вік деревини був 60 років, швидкість деформування 1,5 мм/хв.

Особливості виготовлення дослідних зразків. Процес виготовлення зразків даної серії до певного моменту нічим не відрізнявся від першої. Відмінністю було те, що досліджувані породи деревини приймалися тільки віком 60 років та за стандартної вологості 12%. Отже, зразки перерізом 30x30x120 мм були вирізані з брусів суцільної деревини, після чого поверхні яких були чисто оброблені і в подальшому піддавалися модифікації.

Просочення дослідних зразків полімерною композицією «силор» виконували двома способами: природним шляхом без додаткової стимуляції (поверхнева модифікація) та за допомогою автоклава (глибинна модифікація).

За поверхневої модифікації призми деревини занурювали в посудину із полімерною композицією на 720 хв. Проникнення полімерної композиції «силор» в товщу зразків виконували природнім шляхом, без додаткового стимулювання, в посудині в горизонтальному положенні при повному зануренні

в полімерний розчин. При цьому забезпечувався доступ полімерної композиції до всіх сторін призми.

Змішування компонентів проведено зі співвідношенням 1:4 (одна частина це поліізоціанат + трихлоретилфосфат та 4 частини - етилацетату). Просочування проводили за температури повітря 19°C. Після відведеного часу просочування призми діставали і просушували при температурі 18-21°C протягом двох днів. Детальне дозування та співвідношення компонентів приведено в патенті та технічних умовах [163, 207, 208].

За глибинної модифікації зразки поміщали в автоклав на 2 год під тиском 2,5 атм. Після повного циклу просочування композитом призми діставали з розчину і просушували протягом 12 год.

Утворений твердий композиційний матеріал є екологічно безпечний, не горючий і не токсичний.

Обсяг досліджень четвертої серії випробувань наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4.

Обсяг експериментальних досліджень суцільної модифікованої деревини

№ _{п/п}	Порода деревини	Шифр зразка	Спосіб модифікації	Кількість зразків, шт.
1	Береза	БСМ-П	Поверхнева	6
2	Береза	БСМ-Г	Глибинна	6
3	Вільха	ВСМ-П	Поверхнева	6
4	Вільха	ВСМ-Г	Глибинна	6
5	Ясен	ЯсСМ-П	Поверхнева	6
6	Ясен	ЯсСМ-Г	Глибинна	6
7	Модрина	МСМ-П	Поверхнева	6
8	Модрина	МСМ-Г	Глибинна	6
9	Сосна	ССМ-П	Поверхнева	6
10	Сосна	ССМ-Г	Глибинна	6
11	Ялина	ЯлСМ-П	Поверхнева	6
12	Ялина	ЯлСМ-Г	Глибинна	6

Маркування зразків МСМ–Г: М-модрина; С – суцільна деревина; М – модифікована силором; П –поверхнева модифікація; Г – глибинна модифікація.

Загальна кількість експериментально випробуваних зразків модифікованої суцільної деревини всіх досліджуваних хвойних та листяних порід четвертої серії склала 72 шт.

2.6. Полімерна композиція «силор»

Одним із новітніх українських розробок для просочення та підвищення фізико-механічних характеристик матеріалів є мономер «силор». Дана полімерна композиція розроблена групою авторів під керівництвом проф. Савицького М.В. в Придніпровській державній академії будівництва та архітектури м. Дніпро [31, 184, 185].

Перевагою даного двохкомпонентного модифікатора є те, що його полімеризація після нанесення не потребує додаткових впливів, тобто він затвердіває при температурі повітря 18-21 °С. Після полімеризації поверхня матеріалів стає у вигляді плівки з рівною глянцевою поверхнею жовтуватого відтінку. Перевагою також є те, що його можливо вільно та недорого придбати в наших торгових мережах України. Великою перевагою даної речовини є те, що деталі, елементи та конструкції модифіковані «силором» є екологічно безпечними при експлуатації в закритих приміщеннях.

В подальшому для модифікації суцільної та клеєної деревини різних порід використаємо полімерну композицію «силор».

Довбенко В.С. провів об'ємні дослідження [9, 93, 94] і розробив рекомендації з використання даного композиту для підвищення фізико-механічних властивостей бетону та підсилення експлуатаційних можливостей залізобетонних балок.

Властивості полімерної композиції «силор» детально наведено в табл.2.5.

Таблиця 2.5.

Властивості полімерної композиції «силор»

Компоненти полімерної композиції	Поліізоціанат $O=C=N-CO_2-$ $N=C=O$	Трихлор-етилфосфат $(ClCH_2CH_2O)_3PO$	Етилацетат $C_4H_8O_2$
Масова частка ізоціанатних груп, %	30,2 - 32,0	36,3 - 37,5	32,0 - 36,0
Густина (при $t=25^\circ C$), г/см ³	1,22-1,25	1,42-1,43	0,9
В'язкість (при $t=25^\circ C$), МПа·с	150-250	0,45	90-160
Загальний вигляд	Рідина коричневого кольору	Рідина коричневого кольору	Прозора рідина
Загальний вигляд після полімеризації	Плівка з рівною глянцевою поверхнею жовтуватого відтінку		
Час полімеризації при $t = 20^\circ C$	14- 24 год		
Час повного набору міцності	2 - 3 доби		
Рекомендована температура нанесення	18-21 $^\circ C$		

2.7. Методика експериментальних досліджень за жорсткого та м'якого режиму прикладення навантажень

Експериментальні дослідження 1, 2, 4 серій випробувань проводили за жорсткого режиму прикладення навантажень з постійним контролем приросту переміщень плити випробувальної машини. Експериментальні дослідження третьої серії проводилися за м'якого режиму прикладення навантаження. Всі дослідні зразки піддавались одноразовому короткочасному навантаженню, як за осьового стиску вздовж волокон, так і за поздовжнього сколювання клейових з'єднань дошок.

Перед початком досліджень кожного зразка в журнал випробувань та на монітор ПК заносили наступні дані:

- маркування зразка, що досліджується;
- порядковий номер зразка;
- серію випробувань;
- фактичні розміри зразка-призми;
- вік деревини;
- усереднену вологість деревини;
- вагу зразка;
- день і час проведення випробування;
- температуру та вологість зовнішнього середовища умов проведення лабораторних експериментальних досліджень.

2.7.1. Експериментальні дослідження за жорсткого режиму прикладення навантажень

Експериментальні дослідження за жорсткого режиму прикладення навантажень проводили на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100 з автоматизованою системою керування (рис.2.4) і запису даних [246, 335, 336]

(рис.2.5). Можливість прикладення максимального навантаження випробувальної машини складає 100 кН.

Навантаження зразків проводилося і контролювалося за допомогою ПК та відповідного програмного забезпечення. При випробуванні призм записували швидкість переміщення плити пресу, рівень прикладення навантаження та витрачений на це час. Перед випробуванням зразки центрувалися за геометричними осями на плиті випробувальної машини. Вибіркові експериментальні випробування призм з суцільної деревини проводилися з відеофіксацією процесу деформування від початку завантаження і до повного руйнування матеріалу.

Всі зразки першої серії випробовувались партіями за усередненої вологості деревини в 30%, 21% та 12%. Зразки з деревини були згруповані за віком в 60, 40, 20 років. Швидкість деформування зразків здійснювали за режимів 1,5 мм/хв, 3,0 мм/хв. та 4,5 мм/хв. Експериментальні дослідження проводилися лише за одноразового короткочасного повздовжнього стиску деревини за температури навколишнього середовища 18-20⁰С відповідно до табл.2.1. Випробування проводили з контролем приросту переміщення плити випробувальної машини. Перед початком кожного дослідження проводилось додаткове вимірювання геометричних розмірів зразків та їх вологості. До випробувань допускалися дерев'яні призми з перерізом 30x30x120 мм (± 1 мм) та з вологістю $\pm 1\%$. Відібрані для випробувань зразки були без видимих зовнішніх дефектів. Якщо виготовлені зразки не відповідали даним параметрам за розмірами чи структурою деревини, то вони вибраковувались.

Зразки другої, четвертої серій відбиралися аналогічним чином до першої серії. Випробування даних серій проводилося за режимами вказаними відповідно до табл. 2.2, 2.4.

2.7.2. Експериментальні дослідження за м'якого режиму прикладення навантажень

Експериментальні дослідження третьої серії проводили на випробувальній установці УИМ-50 (рис.2.6). Перед просочуванням на бокові поверхні експериментальних зразків були наклеєні тензодатчики вздовж волокон – з базою 50 мм, поперек – з базою 20 мм (рис.2.5). За відсутності тензодатчиків для вимірювання відносних деформацій деревини на бокові поверхні призм були встановлені індикатори годинникового типу 1МИГ на базі в 100 мм. Для проведення випробувань з визначення міцності клеєної та клеєної модифікованої деревини був використаний універсальний гідравлічний прес УИМ-50.

На початку випробувань кожен із зразків з деревини сосни був відцентрований спочатку за геометричними, а згодом і за фізичними осями поперечного перерізу. Навантаження прикладалось ступенями в 8-10% від передбачуваного руйнівного з врахуванням настанов та вимог [96, 102]. Безпосередньо після прикладення кожного ступеня навантаження знімалися відліки з усіх тензодатчиків чи індикаторів годинникового типу 1МИГ. Для реєстрації показів тензодатчиків використовувалась тензометрична вимірювальна станція СИИТ. На кожному ступені навантаження проводилася витримка не менше 3 хвилин для зняття показів з приладів та запису їх в журнал експериментальних випробувань.

Випробування проводились згідно табл. 2.3.

2.8. Повна діаграма деформування суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі осьовим стиском вздовж волокон

Аналізуючи повну діаграму деформування деревини вздовж волокон та композиційних матеріалів на її основі, бачимо, що вона має спільні закономірності незалежно від породи, вологості матеріалу, швидкості

прикладання зовнішнього короткочасного одноразового навантаження і її можна представити у вигляді показаному на рис. 2.10. Отже, розглянемо цей процес більш детально.

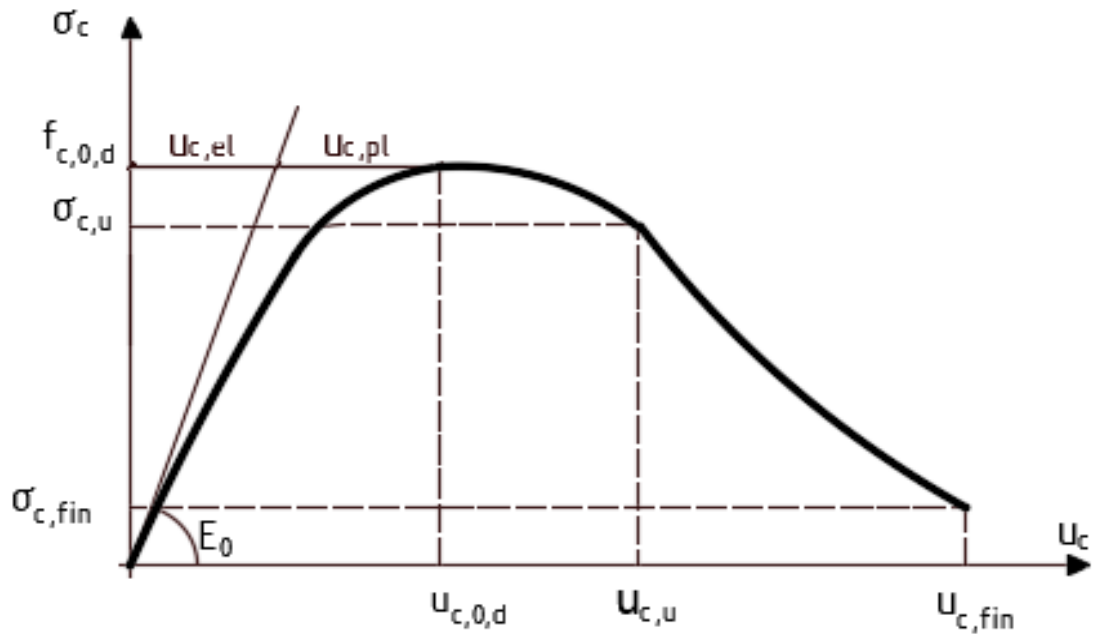


Рис.2.10. Повна діаграма деформування «напруження σ_c – деформації u_c » деревини та композиційних матеріалів на її основі осьовим стиском вздовж волокон

З рисунка 2.10. видно, що відносні деформації деформування деревини за стиску вздовж волокон мають дві складові – пружну деформацію $u_{c,el}$ та пластичну деформацію $u_{c,pl}$.

Пружна складова зростає лише на висхідній вітці деформування і досягає свого максимуму за найбільших напружень, що може сприйняти матеріал, та які рівні границі міцності деревини $f_{c,0,d}$. На спадній вітці деформування деревини пружні деформації $u_{c,el}$ залишаються незмінними аж до повного руйнування і лишаються на відмітці границі міцності деревини.

Пластична складова відносних деформацій деревини $u_{c,pl}$ зростає, поряд з пружною, на висхідній вітці поздовжнього деформування і продовжує

швидкоплинно накопичуватися на спадній вітці з утворенням, спочатку візуально невидимої, а згодом і візуально видимої складки.

Механізми пошкодження волокон за стиску паралельно волокнам, в основному, зумовлюються початковою втратою стійкості та подальшим вигином волокон у зоні розрахункового перерізу, де утворюється складка та дрібним розширенням тріщин на обмеженій поверхні. Подальший розвиток складки проходить за рахунок ковзання загнутих та зломаних волокон деревини однієї частини зрака в проміжки між мікрофібрилами іншої частини зразка. Внаслідок чого проходить розколювання з подальшим глобальним руйнуванням деревини.

2.9. Апроксимація діаграм деформування «напруження-деформації» деревини та композиційних матеріалів на її основі

Однією із невирішених проблем сьогодення є апроксимація дійсних (повних) діаграм деформування «напруження–деформації» суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі різними функціями на протязі всієї роботи матеріалу від початку завантаження і до повного руйнування матеріалу. В минулому, закордонні та вітчизняні науковці вже намагались описувати цей механічний процес за допомогою різних залежностей. Але, на жаль, діаграми були побудовані, на той момент, тільки за експериментальними даними отриманими за м'якого режиму випробувань (за контролю приросту навантаження). Тому апроксимація відбувалась до певної області – області критичних деформацій $u_{c,0,d}$, а не до повного руйнування зразка. Тільки в останні роки [28, 29, 81, 174, 175] були спроби провести належну апроксимацію діаграми деформування з даними за жорсткого режиму випробувань деревини сосни. Тому апроксимація діаграм деформування деревини інших хвойних та листяних порід та композитів на основі деревини є актуальною проблемою дослідників донині.

Провівши детальний огляд літературних джерел та попередню апроксимацію наших діаграм деформування деревини різних порід за різної вологості, ми прийшли до висновку, що найбільш збіжними функціями з експериментальними даними є поліноміальні та неправильні дробово-раціональні залежності [28, 29, 81, 139, 174, 175, 180, 341].

Для того, щоб знайти максимально відповідну аналітичну функцію, яка б давала найбільшу збіжність експериментальних та теоретичних даних, то для цього необхідно провести порівняння цих залежностей за нашими експериментальними дослідженнями та дослідженнями інших авторів [28, 29, 210, 211, 238].

Порівняння проводимо використовуючи найбільш поширені функції.

Перша функція – це є функція кубічної параболи [139]

$$\sigma_c = K_1 \cdot u_c + K_2 \cdot u_c^3, \quad (2.1)$$

де K_1, K_2 - коефіцієнти поліному, які визначаються відповідно за формулами (2.2) і (2.3)

$$K_1 = \frac{1,5 \cdot f_{c,0,d}}{u_{c,0,d}}; \quad (2.2)$$

$$K_2 = -\frac{f_{c,0,d}}{2 \cdot u_{c,0,d}^3}; \quad (2.3)$$

Друга – це неправильна дробово-раціональна функція запропонована [180]

$$\sigma_c = \frac{E_o \cdot u_c - f_{c,0,d} \cdot \left(\frac{u_c}{u_{c1}}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_{co}}{f_{c,0,d}} - \frac{2}{u_{c1}}\right) \cdot u_c}, \quad (2.4)$$

Третя – за нашими пропозиціями – це поліном 4-го степеня, отриманий за допомогою многочлена Лагранжа

$$\sigma_c = w_1 \cdot u_c + w_2 \cdot \frac{u_c^2}{u_{c,0,d}} + w_3 \cdot \frac{u_c^3}{u_{c,0,d}^2} + w_4 \cdot \frac{u_c^4}{u_{c,0,d}^3} = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}, \quad (2.5)$$

де w_1, w_2, w_3, w_4 - коефіцієнти поліному, що отримані за допомогою многочлена Лагранжа та обчислюються за допомогою програми Microsoft Excel.

За цими трьома запропонованими функціями (2.1, 2.4, 2.5) побудуємо апроксимувачі діаграми та порівняємо їх з діаграмами отриманими нами з обмеженням в точці граничних деформацій (рис.2.11). За основу приймемо діаграми деформування деревини сосни.

Розрахунок збіжності дослідних значень суцільної деревини сосни зразків конструкційних розмірів та теоретичних значень з обмеженням в точці граничних деформацій заносимо до табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Збіжність дослідних даних деревини сосни отриманих автором та теоретичних значень

Функція	Кубічної параболі $\sigma_c = K_1 \cdot u + K_2 \cdot u^3$	Неправильна дробово-раціональна $\sigma_c = \frac{E_{co} \cdot u_c - f_{c,0,d} \cdot \left(\frac{u_c}{u_{c1}}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_{co}}{f_{c,0,d}} - \frac{2}{u_{c1}}\right) \cdot u_c}$	Поліном 4-го степеня $\sigma_c = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}$
Збіжність теоретичних та дослідних значень, η	0,991	0,986	0,999

Збіжність дослідних даних та теоретичних значень, які визначені за допомогою функцій (2.1, 2.4, 2.5), визначимо методами математичної статистики

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\sum \Delta^2}{\sum \alpha^2}}, \quad (2.6)$$

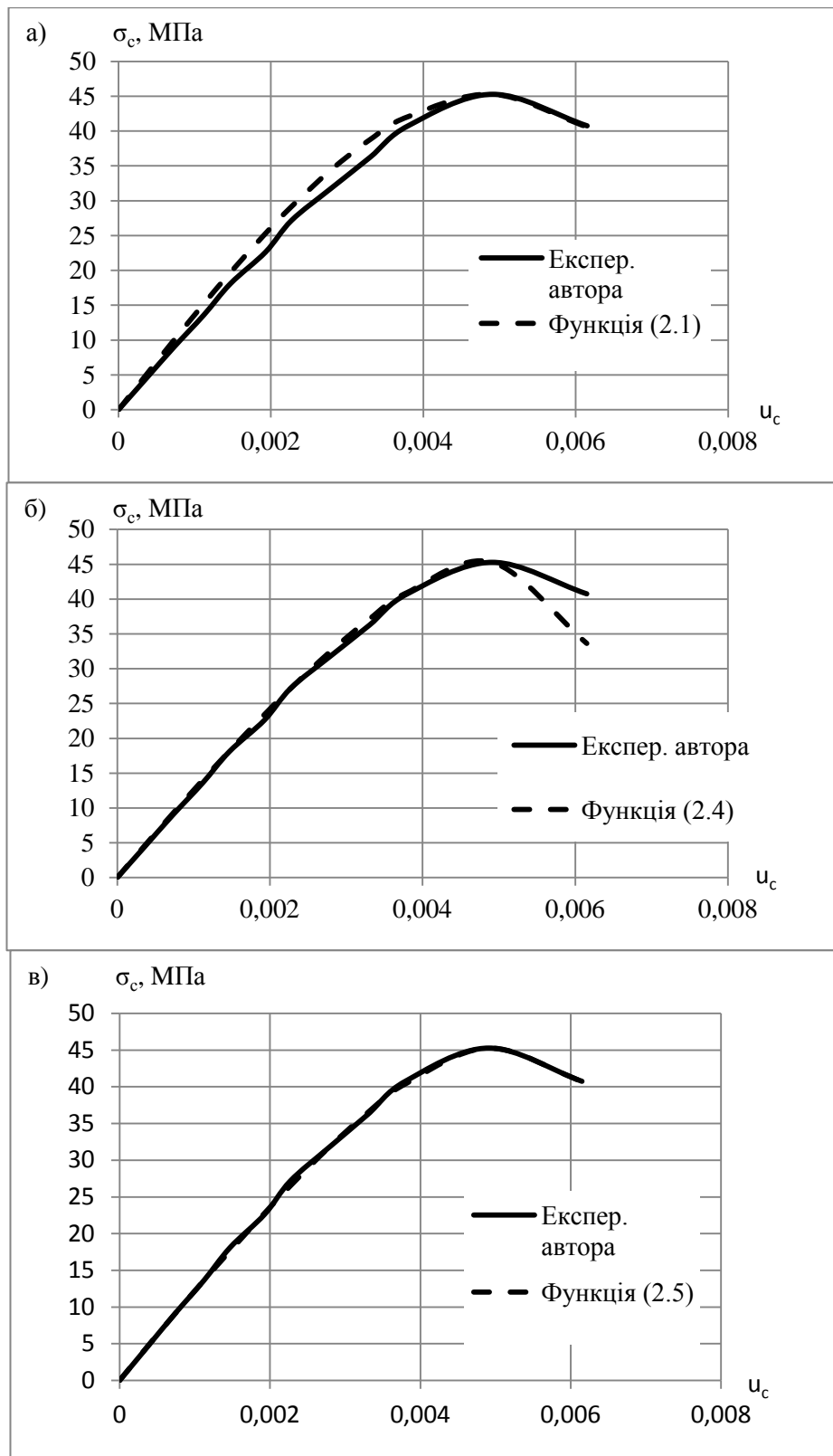


Рис.2.11. Діаграми деформування деревини сосни, побудовані за дослідними значеннями автора та відповідно за функціями: а) кубічної параболі; б) неправильної дробово-раціональної; в) полінома 4-го степеня.

де $\Delta = \sigma_{сер} - \sigma_{анр}$ - відхилення напружень експериментального середнього значення діаграми від відповідних (для заданого $u_{c,d}$) значень за допомогою апроксимуючої функції;

$\alpha = \sigma_{сер} - M$ - центральне відхилення;

$M = \frac{\sum \sigma_{сер}}{n}$ - середнє арифметичне значення напружень.

Отже, за результатами обчислень занесених в табл. 2.7 ми маємо, що збіжність експериментальних та дослідних значень відносних деформацій деревини сосни є досить непоганою для всіх залежностей (з обмеженням деформування в точці граничних деформацій). Але функція (2.5) має найбільшу збіжність $\eta=0,999$. Також встановлено, що функції (2.4) та (2.5) дають в основному ідеальну збіжність на діаграмах з обмеженням в точці критичних деформацій.

Якщо ж говорити про повну діаграму деформування деревини сосни на стиск вздовж волокон, то залежності (2.1) та (2.4) незадовільно описують діаграму деформування на нижніх частинах спадної вітки, де проходить гіпер велике зростання пластичних деформацій, а функція (2.5) на цій ділянці дає задовільну збіжність експериментальних та дослідних значень відносних деформацій (рис.2.12).

Отже, враховуючи вище зазначене зробимо висновок, що для опису процесу деформування деревини сосни вздовж волокон за дії одноразового короткочасного навантаження за проведеними нами експериментальними дослідженнями найбільш придатною функцією є поліном 4-го степеня (2.5).

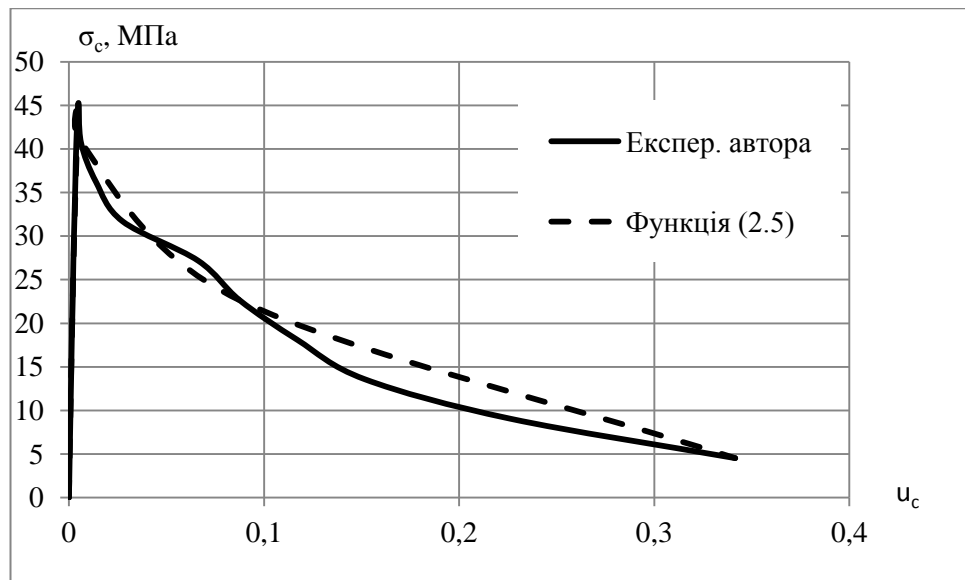


Рис.2.12. Повна діаграма деревини сосни, яка побудована за експериментальними значеннями та за функцією полінома 4-го степеня.

Також перевіримо дану функцію (2.5) з експериментальними значеннями інших вчених. Зокрема, з дослідними даними Вареника К.А. [28, 29] (рис.2.13) та Тутурина С.В. [210, 211, 238] (рис.2.14) з обривом в точці граничних деформацій.

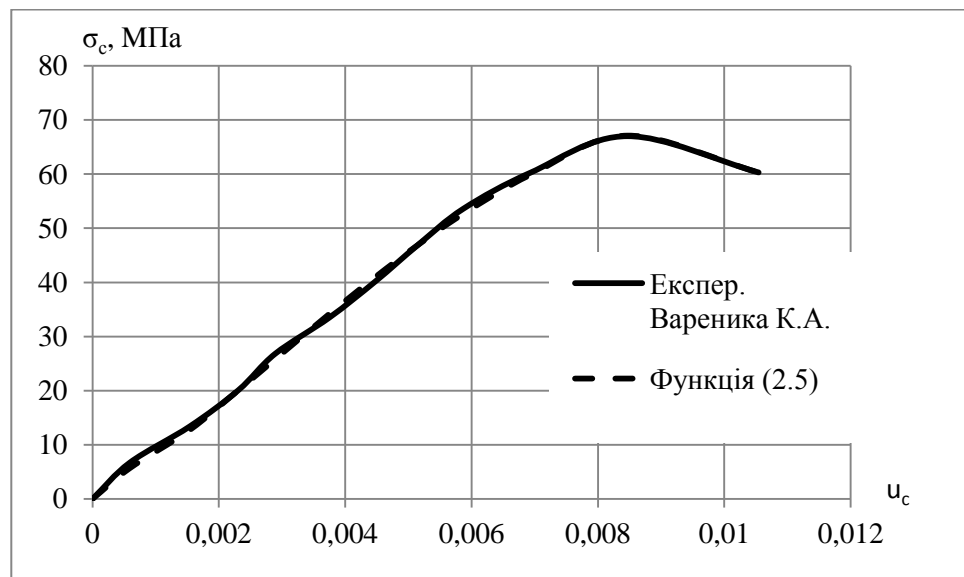


Рис.2.13. Діаграма деревини сосни побудована за експериментальними значеннями Вареника К.А. [28, 29] та за функцією полінома 4-го степеня

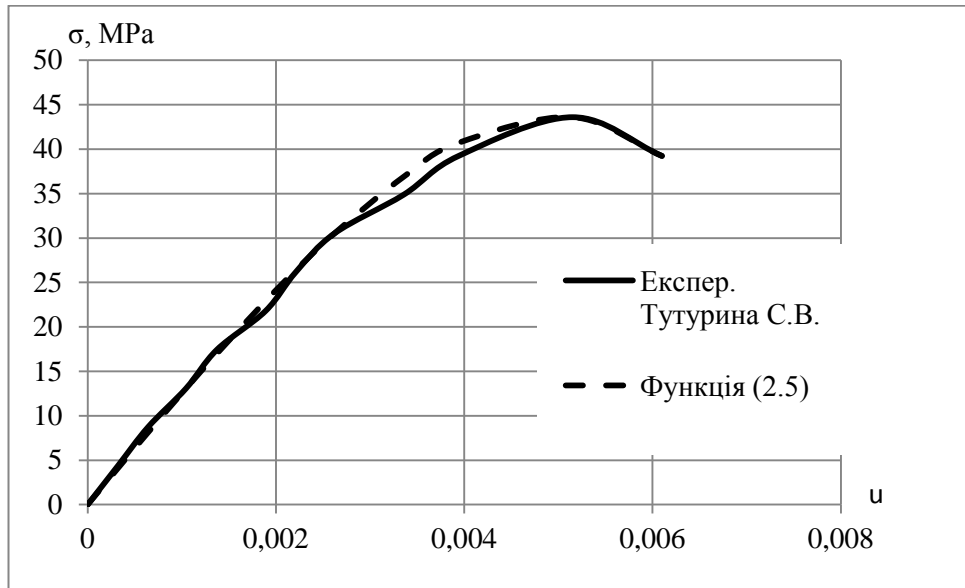


Рис.2.14. Діаграма деревини сосни побудована за експериментальними значеннями Тутурина С.В. [210, 211, 238] та за функцією полінома 4-го степеня

Таблиця 2.7

Збіжність дослідних даних деревини сосни різних вчених та теоретичних значень за функцією (2.5)

Дослідні дані вчених	Автора	Вареника К.А. [29]	Тутурина С.В. [210]
Функція	Поліном 4-го степеня	Поліном 4-го степеня	Поліном 4-го степеня
	$\sigma_c = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}$	$\sigma_c = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}$	$\sigma_c = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}$
Збіжність теоретичних та дослідних значень, η	0,999	0,999	0,997

Отже, окрім збіжності з експериментальними даними отриманими нами, ми спостерігаємо також хорошу збіжність функції (2.5) з експериментальними значеннями інших вчених (табл.2.7).

Після апроксимації діаграм механічного стану суцільної деревини (повна діаграма від початку роботи до руйнування, діаграми з обмеженням в точці критичних та граничних деформацій) (рис.2.11, рис.2.12, рис.2.13, рис.2.14) та проведеної математичної статистики (табл.2.6, табл.2.7) можемо констатувати, що найбільш прийнятною функцією для апроксимації діаграм на всіх ділянках є запропонований нами поліном 4-го степеня (2.5). Тому приймаємо цю функцію для подальших досліджень роботи деревини інших порід та її використання для опису діаграм механічного стану та розрахунків.

2.10. Критичні деформації суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі

Критичні деформації суцільної деревини або композиційних матеріалів на її основі $u_{c,0,d}$ – це деформації, які відповідають максимальному напруженню зразка $f_{c,0,d}$. Вони знаходяться на вершині діаграми «напруження–деформації» (рис.2.10) і складаються з пружної $u_{c,el}$ та пластичної $u_{c,pl}$ складових.

Визначення критичних деформацій деревини теоретичним шляхом знаходимо в роботі Гринкруг Н.В. [81]. Авторка визначала такі деформації, аналізуючи експериментальні дослідження, як свої, так і інших вчених. Запропонована формула для визначення критичних деформацій носить емпіричний характер, залежить від максимального напруження та не виділяє пружні і пластичні складові деформування суцільної деревини

$$u_{c,0,d} = (735,825 \cdot \sqrt{f_{c,0,d}} - 3,902) \cdot 10^{-6} \quad (2.7)$$

Але більшість вчених відносні критичні деформації деревини визначають та записують у вигляді цифрового значення [35, 83, 84, 126]. Так як, в минулому столітті не було відповідного обладнання для точного визначення критичних деформацій в момент руйнування матеріалу при проведенні експериментальних досліджень за м'якого режиму прикладення короткочасних одноразових навантажень, то побудова повних діаграм

«напруження–деформації» та визначення точних значень критичних деформацій в перед руйнівній стадії приймали при прогнозуванні їх роботи інтуїтивно.

Отже, величину критичних відносних деформацій деревини пропонується визначати за сумою відносних пружних та пластичних деформацій за формулою

$$u_{c,0,d} = u_{c,el} + u_{c,pl}, \quad (2.8)$$

де $u_{c,el}$ – відносна пружна деформація суцільної деревини або композиційних матеріалів на її основі;

$u_{c,pl}$ – відносна пластична деформація суцільної деревини або композиційних матеріалів на її основі.

Враховуючи [91, 237] та наші експериментальні дослідження формула (2.8) набуде вигляду

$$u_{c,0,d} = f_{c,0,d} / E_0 + c_1 \cdot f_{c,0,d}^2, \quad (2.9)$$

де E_0 – початковий модуль пружності суцільної деревини або композиційних матеріалів на її основі;

c_1 – коефіцієнт, що залежить від вологості і віку суцільної деревини, модифікатора, якщо деревина модифікована, і способу модифікації цієї деревини.

За стандартної вологості 12% та віку деревини в межах 50...100 років коефіцієнт $c_1 = 6,55 \cdot 10^{-7} (\text{МПа})^{-2}$ для будь-якої породи листяної та хвойної породи деревини.

Визначимо відносні критичні деформації деревини теоретичним шляхом відповідно за формулами (2.7) та (2.9), посилаючись на відомі дані експериментальних досліджень Тутурина С.В. [210], Вареника К.А. [29] та наші дані (рис.2.15). Експериментальні значення середніх відносних критичних деформацій суцільної деревини різних авторів та значення відносних

критичних деформацій визначених за формулами (2.7) та (2.9) наведені в табл.2.8.

Таблиця 2.8

Експериментальні значення середніх критичних деформацій
деревини різних авторів та відповідні значення критичних деформацій
визначених за формулами (2.7) та (2.9)

Порода деревини	Переріз ахbхh, мм	К-сть призм шт.	$f_{c,0,d}$ МПа	$u_{c,0,d,exp}$	E_0 , МПа	$u_{c,0,d,th}$ функція (2.7)	$u_{c,0,d,th}$ функція (2.9)	$u_{c,el,th}$ функція (2.9)	$u_{c,pl,th}$ функція (2.9)
Експериментальні дослідження автора									
Береза	30x30x120	9	46,1	0,00525	12300	0,00499	0,00514	0,00375	0,00139
Вільха	30x30x120	9	40,8	0,00450	11700	0,00470	0,00458	0,00349	0,00109
Ясен	30x30x120	9	57,7	0,00610	16000	0,00559	0,00579	0,00361	0,00218
Модрина	30x30x120	9	59,7	0,00641	13700	0,00568	0,00669	0,00436	0,00233
Сосна	30x30x120	9	45,3	0,00515	12900	0,00495	0,00485	0,00351	0,00134
Ялина	30x30x120	9	43,6	0,00467	14400	0,00486	0,00427	0,00303	0,00124
Експериментальні дослідження Тутуріна С.В. [210]									
Сосна	30x30x90	16	44,3	0,00481	12850	0,00489	0,00473	0,00344	0,00129
Сосна	40x40x120	12	51,0	0,00599	12850	0,00525	0,00567	0,00397	0,00170
Сосна	50x50x150	10	38,2	0,00411	12850	0,00451	0,00393	0,00297	0,00096
Сосна	60x60x180	13	42,6	0,00464	12850	0,00480	0,00451	0,00332	0,00119
Сосна	70x70x210	8	36,8	0,00401	12850	0,00447	0,00375	0,00286	0,00089
Експериментальні дослідження Вареника К.А. [29]									
Сосна	30x30x120	5	67,1	0,00843	14800	0,00602	0,00748	0,00453	0,00295

Проведемо статистичну оцінку формул (2.7), (2.9) з визначення критичних деформацій різних порід деревини (рис.2.15 та рис.2.16).

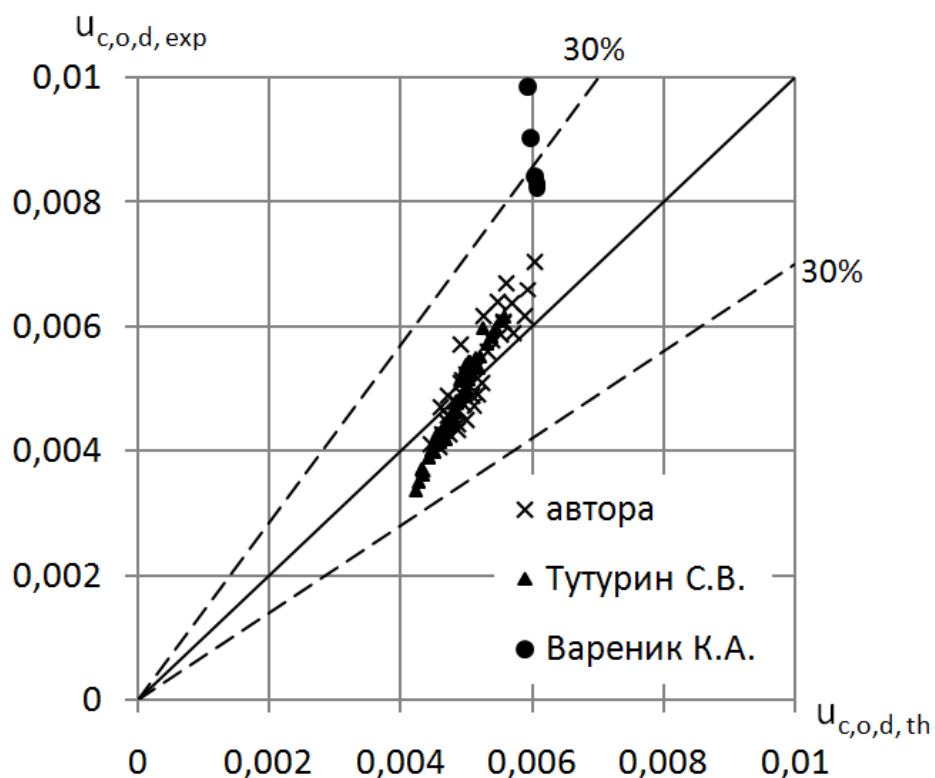


Рис. 2.15. Відхилення теоретичних за формулою (2.7) та дослідних значень критичних деформацій деревини різними дослідниками

Формула (2.7) дає хорошу збіжність за максимального напруження від 40 до 50 МПа. Нижче та вище таких напружень збіжність вже є менш задовільною або взагалі незадовільною. Залежність (2.7) також має ряд інших недоліків, зокрема, носить чисто емпіричний характер, в даній функції немає відокремлення відносних пружних та пластичних деформацій деревини, залежить тільки від максимального напруження.

З рис. 2.16 видно, що формула (2.9) має кращу збіжність ніж (2.7) з експериментальними даними, бо практично всі експериментальні дані входять в межах $\pm 20\%$. Функція (2.9) також має ряд інших переваг: є досить простою та зручною при розрахунках; в ній виділено дві складові - пружну та пластичну; не носить емпіричний характер, залежить від максимального напруження та початкового модуля пружності деревини; може бути використана, як для різних

хвойних, так і листяних порід деревини. В подальшому саме ця функція буде прийнята для різного роду розрахунків елементів та конструкцій з деревини.

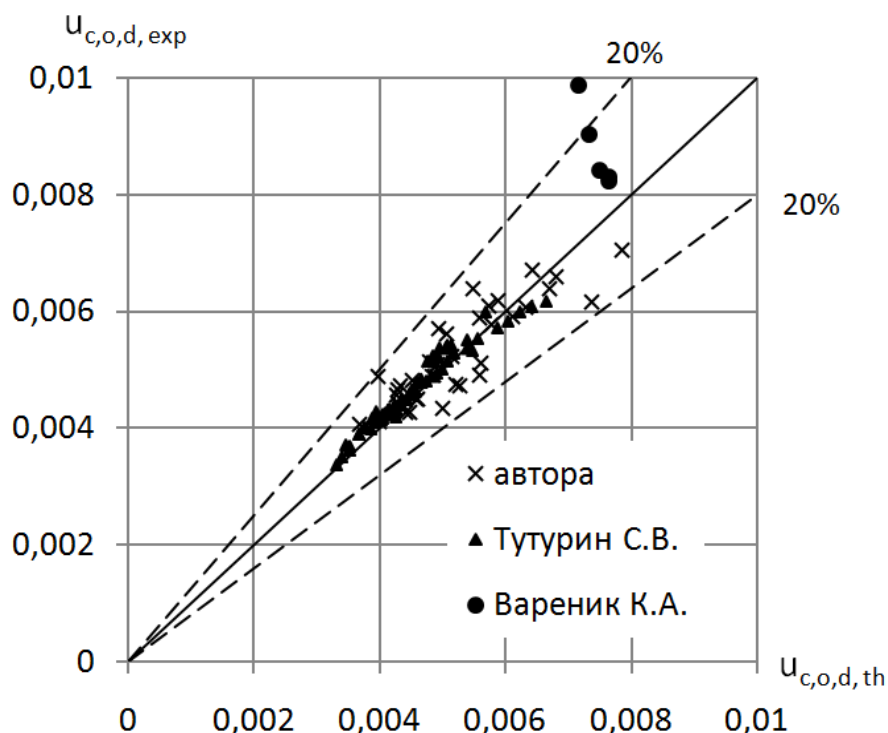


Рис.2.16. Відхилення теоретичних значень автора за формулою (2.9) та дослідних критичних деформацій деревини різними дослідниками

Формула (2.9) була апробована близько на 150 листяних та хвойних породах деревини, які вирощені на території України, Східної та Центральної Європи, країнах Північної Америки (США та Канади) (додатки А1-А6).

2.11. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що залежність «напруження σ_c – деформації u_c » за одноразового короткочасного стиску вздовж волокон з постійною швидкістю деформування внаслідок прояву пластичних деформацій, які виникають за найменших напружень, є нелінійною

з самого початку завантаження. Але зі збільшенням величини напружень викривлення діаграми за повздовжнього стиску деревини також збільшується (рис. 2.10, рис.2.11, рис.2.13, рис.2.14). Тому при визначенні початкового модуля пружності та модуля деформацій необхідно враховувати такі закономірності роботи матеріалу. Модуль деформацій (січний модуль пружно-пластичності) деревини та композиційних матеріалів на її основі E' залежить від рівня напружень σ_c .

Враховуючи наші експериментально-теоретичні дослідження зразків конструкційних розмірів суцільної, клеєної та модифікованої деревини осьовим стиском уздовж волокон короткочасним навантаженням за жорсткого режиму прикладення навантаження з постійною швидкістю деформування та пропозиції, які наведені в роботі [143], модуль деформацій (січний) можливо записати у наступному вигляді

$$E' = E_o(1 \pm \lambda_{f_{c,0,d}} \eta), \quad (2.10)$$

де $\lambda_{f_{c,0,d}}$ – коефіцієнт пластичності суцільної, клеєної та модифікованої деревини за стиску уздовж волокон;

η – рівень напружень в суцільній, клеєній та модифікованій деревині,.

Для перевірки залежності (2.10) визначимо початкові модулі пружності та модулі деформацій (січні) листяних (берези, вільхи, ясена) та хвойних (сосни, ялини, модрина) порід деревини за стандартної вологості 12% віком 60 років та проведемо статистичну оцінку отриманих значень (рис.2.17 та табл. 2.9). За результатами таких експериментально-статистичних досліджень було підтверджено наявність лінійних кореляційних залежностей між модулем деформацій і рівнем напружень (рис.2.17 та табл. 2.9). Лінійність залежностей $E' - \eta$ підтверджується хорошим ступенем відповідності кореляційних та дослідних значень відносних деформацій, які приймалися в межах $\eta = 0,2 - \eta = 0,8$ згідно [143].

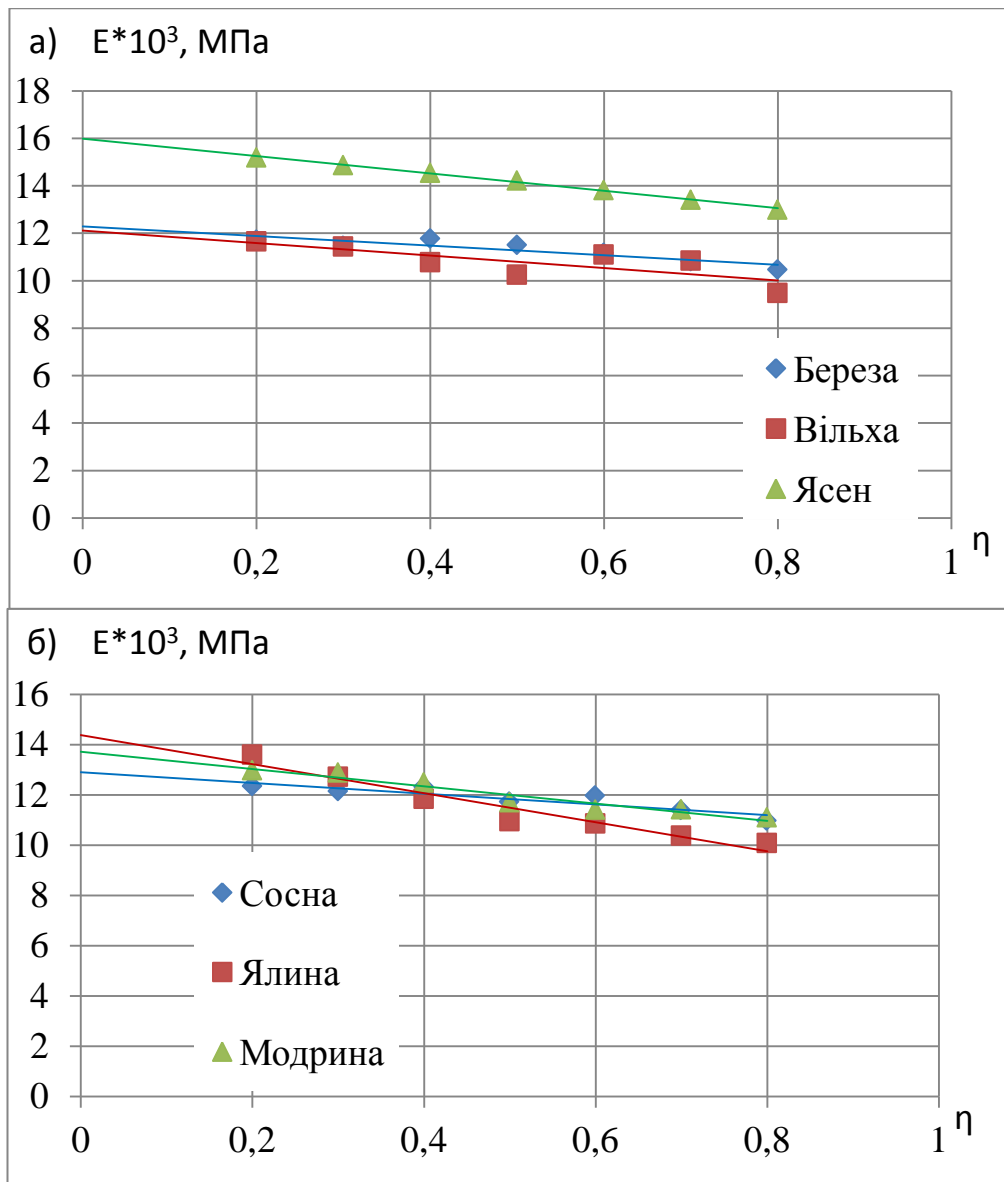


Рис.2.17. Діаграми «E- η » (січний модуль – рівень напружень) різних порід суцільної деревини у віці 60 років за стандартної вологості 12%:

а) листяних; б) хвойних

Певною мірою, згідно рис.2.17, найбільш наближеним січний модуль пружно-пластичності E' до початкового модуля пружності E_0 можливий лише за малих значень напружень σ_c . Встановити початковий модуль пружності E_0 за кутом нахилу прямої, яка буде дотична до кривої «напруження σ_c – деформації u_c » в точці початку координат практично неможливо без встановлення аналітичної залежності цієї кривої (рис.2.10).

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії « $E' - \eta$ »
суцільної деревини листяних та хвойних порід

Назва зразка	Кореляційне рівняння	r	m_r	$\frac{r}{m_r}$	$V, \%$
БС-12-60	$E' = 12,286 \cdot (1 - 0,044 \cdot \eta)$	0,901	0,071	13	1,71
ЯсС-12-60	$E' = 15,989 \cdot (1 - 0,064 \cdot \eta)$	0,998	0,001	732	3,13
ВС-12-60	$E' = 12,061 \cdot (1 - 0,057 \cdot \eta)$	0,939	0,044	12	1,78
СС-12-60	$E' = 12,910 \cdot (1 - 0,047 \cdot \eta)$	0,905	0,068	13	1,71
ЯлС-12-60	$E = 14,386 \cdot (1 - 0,090 \cdot \eta)$	0,969	0,023	42	2,57
МС-12-60	$E = 13,716 \cdot (1 - 0,058 \cdot \eta)$	0,966	0,058	38	1,55

Метод, що використовується дослідниками в даний час для цієї цілі багаторазове повторне завантаження-розвантаження (циклічне завантаження до певного рівня з розвантаженням) для вибору пластичних деформацій деревини не приводить до чисто лінійної залежності між напруженнями та деформаціями. Тому таким способом не вдається встановити істине значення початкового модуля пружності E_0 . Тому початковий модуль пружності деревини E_0 можливо встановити з умови граничного положення січного модуля пружно-пластичності E' за умов, коли кут нахилу та відносні деформації прямують до 0.

Таким чином можна констатувати, що початковий модуль пружності і модуль деформацій (січний) деревини та композиційних матеріалів на її основі можна з великою точністю встановити аналітично за формулою (2.10) або графічно за допомогою діаграми «січний модуль – рівень напружень» при значеннях $\eta=0$.

2.12. Граничні деформації суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі

Граничні відносні деформації суцільної деревини різних хвойних та листяних порід або композиційних матеріалів на її основі $u_{c,u}$ - це деформації деревини, які, наприклад, відповідають відносним деформаціям деревини згинального елемента в стиснутій зоні розрахункового перерізу за максимального моменту M_d (руйнівного). Вони відповідають таким же відносним напруженням, які знаходяться на спадній вітці діаграми «напруження–деформації» (рис.2.10). Встановити експериментальним шляхом, в якій точці діаграми спадної вітки вони знаходяться дуже складно. Тому їх необхідно моделювати.

Критичні та граничні деформації фактично дають повний спектр деформівності досліджуваного матеріалу та дозволять в подальшому розраховувати елементи та конструкції з суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі за так званою «деформівною схемою».

Для того, щоб визначити відносні граничні деформації для пружно-пластичного матеріалу необхідно побудувати діаграму деформування «момент-кривина» для згинального елемента прямокутного перерізу з суцільної листяних та хвойних порід деревини або композиційного матеріалу на їх основі. Побудова даної діаграми проводиться в наступній послідовності: визначається напружено-деформований стан згинального елемента, будуються діаграми деформування матеріалу і проводяться необхідні розрахунки для побудови діаграми «момент-кривина».

Основними умовами для визначення напружено-деформованого стану є:

- 1) всі необхідні рівняння рівноваги, які виникають в поперечному перерізі;
- 2) деформування в поперечному перерізі проходить за лінійним законом (зі збільшенням висоти перерізу, деформації збільшуються пропорційно);

3) використання функцій діаграм деформування за стиску та розтягу вздовж волокон в стиснутій та розтягнутій зонах розрахункового поперечного перерізу, отриманих на основі експериментальних досліджень.

Тому враховуючи такі умови для деформаційної моделі запропоновано опис діаграми деформування матеріалу деревини або композиційного матеріалу з обмеженням в точці граничних деформацій стиском вздовж волокон, з врахуванням їх пружно-пластичних складових (рис.2.18а) за формулою (2.5). яку запишемо у вигляді

$$\sigma_{c,d} = f_c(u) = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}, \quad (2.11)$$

де $\sigma_{c,d}$ - нормальне напруження стиску вздовж волокон;

$u_{c,d}$ – відносна деформація стиску;

w_i - коефіцієнти полінома функції (2.11);

Напруження в розтягнутій зоні визначаємо за формулою лінійним розподілом напружень (рис.2.18б)

$$\sigma_{t,d} = f_t(u) = E_0 \cdot u_t, \quad (2.12)$$

де $\sigma_{t,d}$ - нормальне напруження розтягу вздовж волокон;

$u_{t,d}$ – відносні деформації розтягу.

Використовуючи залежності (2.11) та (2.12), визначимо внутрішні зусилля стиску та розтягу, які виникають в перерізі від дії зовнішнього моменту:

– за стиску

$$N_{c,d} = b \cdot z_c \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+1} \cdot \frac{w_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}; \quad (2.13)$$

– за розтягу

$$N_{t,d} = b \cdot z_t \cdot \frac{E_0 \cdot u_t}{2}. \quad (2.14)$$

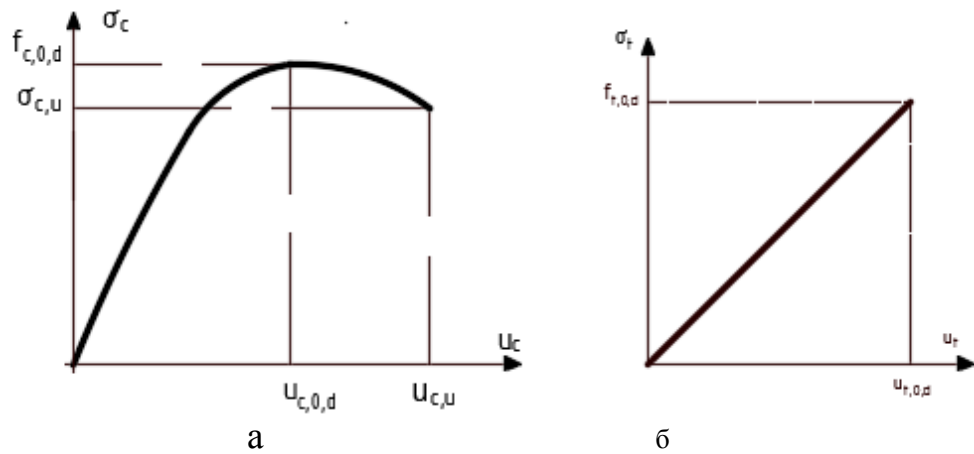


Рис.2.18. Діаграми «напруження–деформації» деревини та композиційних матеріалів на її основі: а) за стиску вздовж волокон; б) за розтягу вздовж ВОЛОКОН

Схематично розподіл напружень та деформацій в розрахунковому нормальному перерізі згинального елемента показано на рис.2.19.

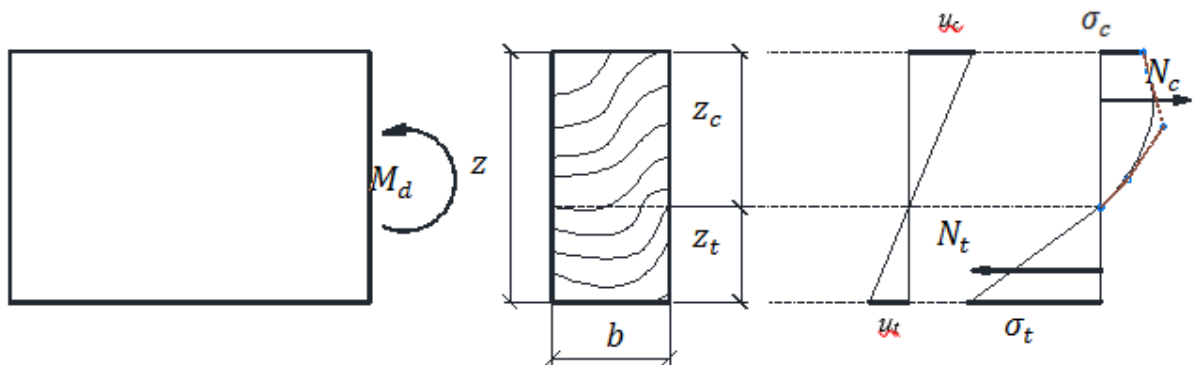


Рис. 2.19. Схема розподілу зусиль та деформацій в розрахунковому нормальному перерізі згинального елемента прямокутного перерізу

Внутрішні згинальні моменти, які сприймає стиснута та розтягнута зони в згинальному елементі прямокутного перерізу на базі врахування діаграм механічного стану матеріалу, можливо записати в наступному вигляді:

- для стиснутої зони

$$M_{c,d} = b \cdot z_c^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}; \quad (2.15)$$

- для розтягнутої зони

$$M_{t,d} = b \cdot z_t^2 \cdot \frac{E_0 \cdot u_t}{3}. \quad (2.16)$$

Сумарний згинаючий момент, який може сприйняти розрахунковий поперечний переріз елемента від дії зовнішнього навантаження, що працює на поперечний згин визначиться

$$M_d = b \cdot z_c^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} + b \cdot z_t^2 \cdot \frac{E_0 \cdot u_t}{3}. \quad (2.17)$$

Для побудови діаграми «момент-кривина» використаємо запропоновану функцію (2.11) механічного стану деревини або композиційних матеріалів на її основі.

Алгоритм побудови діаграми «момент–кривина» згинального елемента прямокутного перерізу суцільної деревини листяних та хвойних порід чи композиційного матеріалу на її основі показано на рис. 2.20.

На основі графіка «момент-кривина» побудуємо діаграму «момент-деформація», з якої знаходимо значення деформацій за максимального моменту, яка відповідає граничним деформаціям суцільної деревини або композиційного матеріалу на її основі $u_{c,u}$.

2.13. Висновки до другого розділу

1. Наведено методику експериментально-теоретичних досліджень з поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі.

2. Вибрано матеріали та виготовлено основні (призми з суцільної, клеєної та модифікованої деревини) та допоміжні (для визначення міцності клейових з'єднань) дослідні зразки.

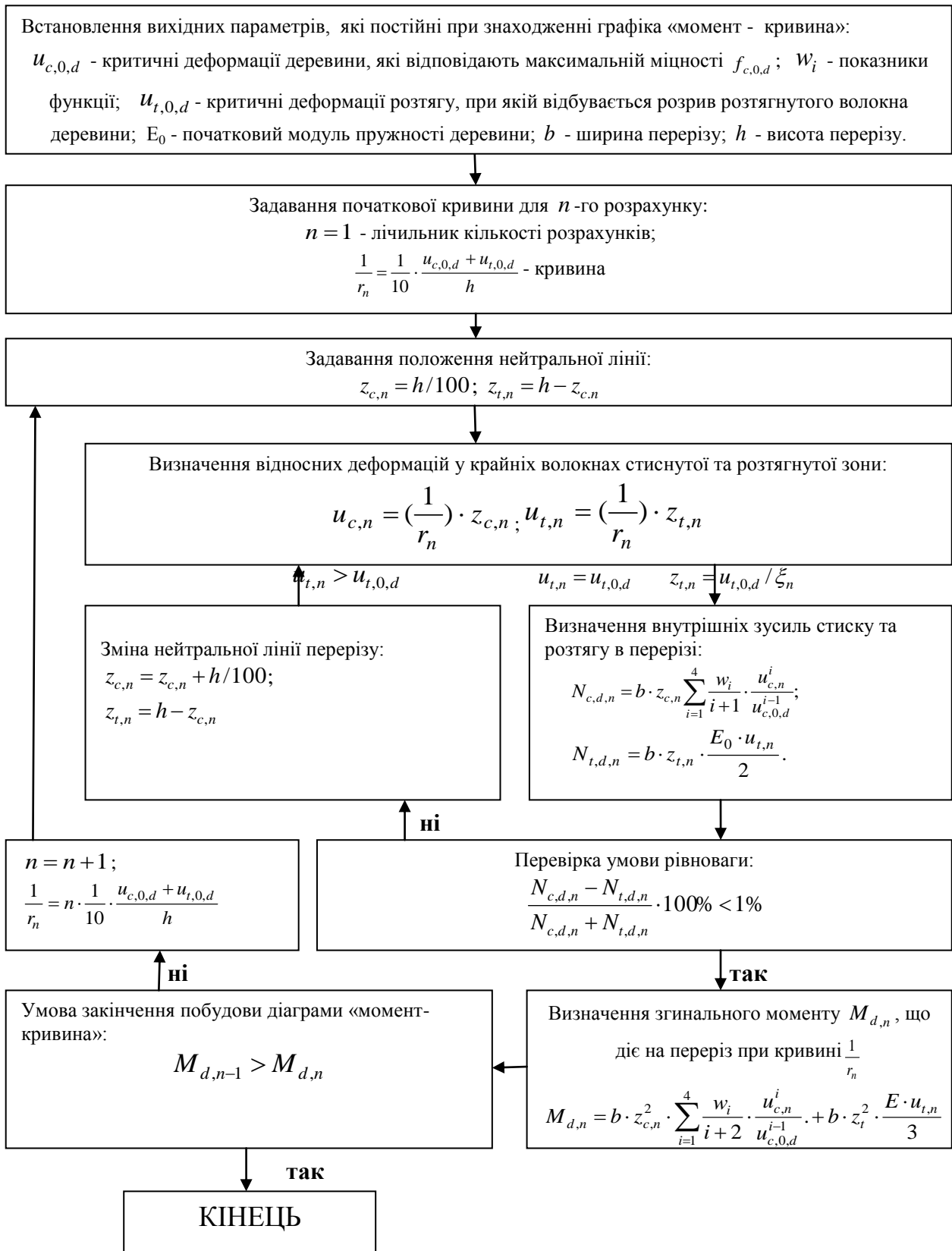


Рис. 2.20. Алгоритм побудови діаграми «момент-кривина» згинального елемента прямокутного перерізу суцільної та модифікованої силором деревини листяних та хвойних порід

3. Запропоновано полімерну композицію «силор» для здійснення поверхневої та глибинної модифікації дослідних зразків з суцільної та клеєної деревини.

4. Удосконалено методику експериментальних досліджень деревини за стиску вздовж волокон за жорсткого та м'якого прикладення одноразових короткочасних навантажень.

5. Проведено повний аналіз діаграми деформування деревини вздовж волокон та композиційних матеріалів на її основі. Встановлено, що відносні деформації деревини повної діаграми деформування складаються з пружних та пластичних відносних деформацій.

6. Встановлено, що відносні пружні деформації деревини за повздовжнього стиску зростають лише на висхідній ділянці діаграми і мають найбільші значення за межі міцності матеріалу, в той же час відносні пластичні деформації деревини накопичуються, як на висхідній, так і на спадній ділянках повної діаграми механічного стану деревини.

7. Подібність кривих деформування суцільної, клеєної та модифікованої деревини за повздовжнього стиску за дії одноразових короткочасних навантажень дозволяє використовувати, як апроксимуючу, залежність у вигляді полінома четвертого степеня (2.5), як на висхідній, так і на спадній ділянках повної діаграми.

8. Вперше наведено формулу з визначення критичних деформацій деревини та композиційних матеріалів на її основі, яка включає пружну та пластичну складові.

9. Вперше запропоновано методику визначення граничних відносних деформацій деревини на основі побудови діаграми «момент-кривина» згинального елемента прямокутного перерізу суцільної, клеєної та модифікованої деревини листяних та хвойних порід.

10. Удосконалено методику з визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій (січного) з врахуванням пружно-пластичності таких матеріалів.

Матеріали розділу 2 наведені в наступних працях [40-42, 43, 46, 53-55, 57-60, 62, 64, 65, 243, 272, 337].

РОЗДІЛ 3

ПОБУДОВА ДІЙСНИХ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ ХВОЙНИХ ТА ЛИСТЯНИХ ПОРІД СУЦІЛЬНОЇ ДЕРЕВИНИ КОНСТРУКЦІЙНИХ РОЗМІРІВ « σ_c-u_c » З ВРАХУВАННЯМ ФАКТОРА ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ

3.1. Аналіз дійсної (повної) діаграми деформування деревини « σ_c-u_c » за короткочасного одноразового стиску вздовж волокон за жорсткого режиму випробувань

В даному розділі будуть побудовані дійсні діаграми деформування різних порід суцільної деревини (сосни, ялини, модрина, берези, вільхи та ясена) « σ_c-u_c » на стиск вздовж волокон короткочасним навантаженням за жорсткого режиму випробувань з урахуванням впливу вологості. Для повної картини дійсної роботи суцільної деревини різних порід буде проводитися детальний аналіз усіх параметрів діаграм, зокрема початкового модуля пружності, модуля деформацій, критичних та граничних деформацій та ін. Також буде здійснюватись апроксимація діаграм функцією (2.5). На всіх етапах роботи проводиться детальний статистичний аналіз експериментальних та теоретичних досліджень.

Перед початком побудови діаграм різних порід деревини наведемо повну діаграму деформування (рис.3.1а), що нами запропонована та підтверджена експериментом, яка характерна для будь-якої породи деревини та композиційних матеріалів на її основі. А також роботу деревини на запропонованих ділянках (рис.3.1б). Виділимо основні її ділянки (в подальшому будемо проводити аналіз за визначеними ділянками) з дещо іншим баченням основної проблеми з визначення критичних та граничних відносних деформацій деревини.

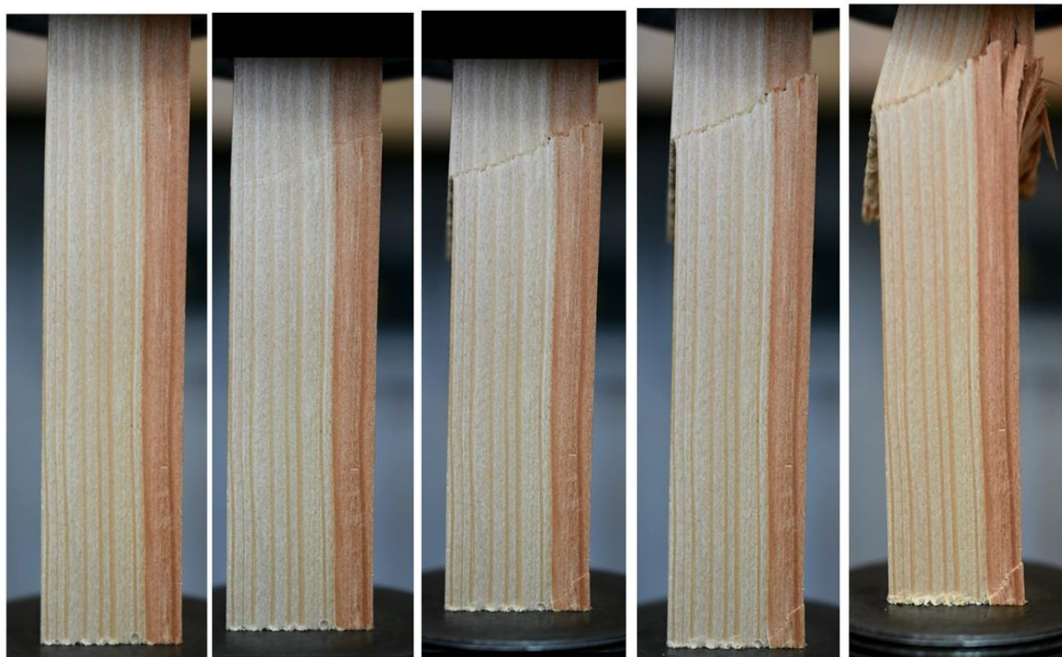
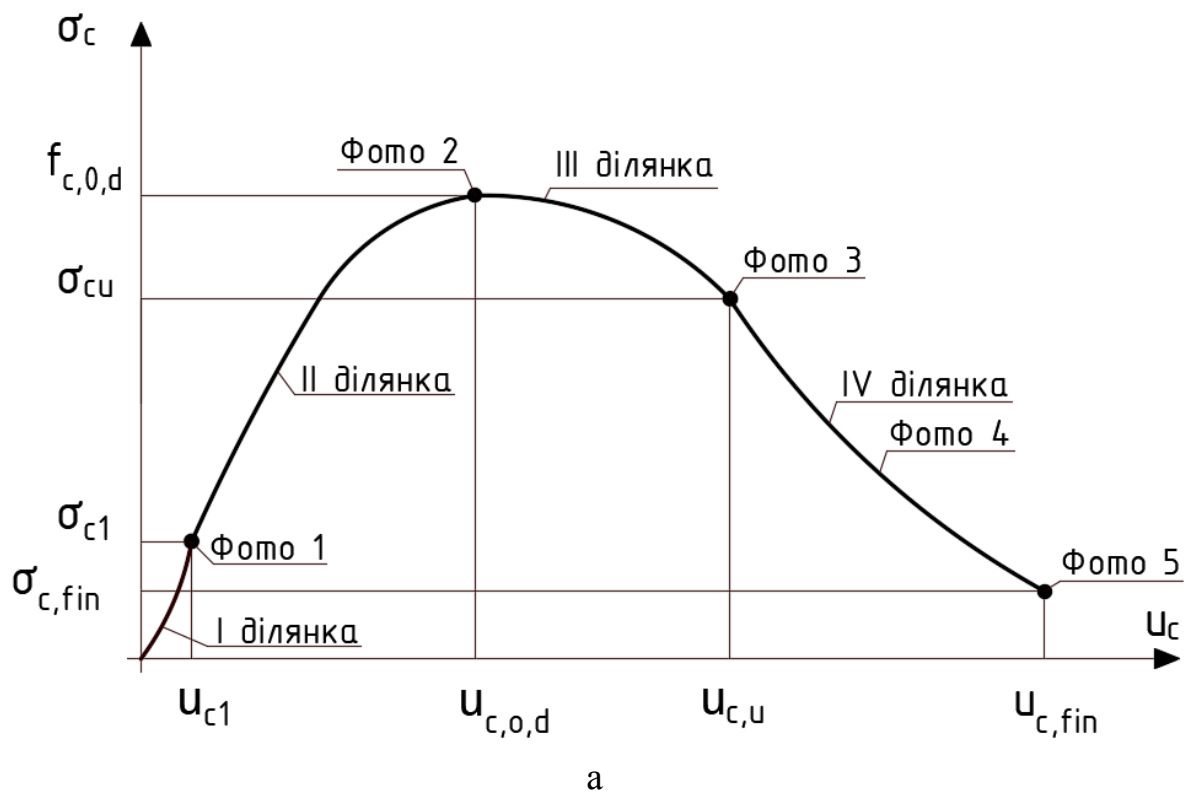


Фото 1 Фото 2 Фото 3 Фото 4 Фото 5

б

Рис.3.1. Еталон повної діаграми деформування деревини «навантаження – переміщення плити випробувальної машини» за стиску вздовж волокон – а; роботи деревини на ділянках – б

Отже, умовно поділимо діаграму на висхідну вітку (від 0 до точки максимального напруження та критичних деформацій) та спадну (від точки максимального напруження та критичних деформацій до моменту руйнування). Всю діаграму деформування деревини за дії повздовжнього стиску можливо поділити на чотири характерні ділянки: дві докритичні та дві закритичні.

Перша ділянка докритична – початковий етап роботи зразка характеризується значним викривленням діаграми, на яку впливають деформації торцевого обтиснення зразка і знаходиться в межах $\eta=0$ до $\eta=0,15$ – $\eta=0,25$ від максимального напруження.

Друга ділянка також докритична від завершення першої ділянки до настання критичних відносних деформацій. На цій ділянці знаходиться експлуатаційний режим роботи зразка – робота матеріалу за нормальних умов експлуатації і аварійний режим експлуатації роботи зразка – на даному етапі матеріал може зруйнуватися за певного часу тривалого або малоциклового навантаження. Відносні деформації деревини починають зростати з більшою швидкістю в порівнянні з першою ділянкою, ділянка набуває викривлення в сторону осі напружень. На даній ділянці діаграма на висхідній вітці досягає найвищої точки максимальних напружень, їм відповідають критичні деформації.

Далі матеріал переходить в наступну фазу роботи – на спадній вітці (закритична стадія роботи), де явно виділяється ще 2 ділянки – третя та четверта.

Отже, на низхідній (спадній) гілці деформування деревини можливо візуально спостерігати дві відмінні між собою ділянки (рис.3.1):

- третю ділянку – це початок спадної вітки, що характеризується стрімким зменшенням міцності деревини, і до граничних відносних деформацій деревини;

- четверту ділянку від граничних відносних деформацій деревини, яка характеризується збільшенням швидкості деформування за менш стрімкого, ніж на першій ділянці зменшенням міцності, та на якій деформації можуть

досягати гіпер великих величин і це призводить до повного руйнування матеріалу.

Перехід від однієї ділянки до іншої на спадній гілці має діапазон і коливається в межах від $0,95f_{c,0,d}$ до $0,85f_{c,0,d}$.

Докритична висхідна ділянка повздовжнього деформування діаграми « $\sigma_c - u_c$ » відповідає стійкому стану повздовжніх волокон деревини, а закритична спадна (низхідна) – нестійкому.

Отже, приходимо до висновку, що на висхідній та спадній вітках на всіх чотирьох ділянках роботи зразків з деревини можливо регулювати швидкість деформування за допомогою сервогідравлічної випробувальної машини та її відповідного обладнання. За жорсткого режиму прикладення зовнішнього навантаження (за приростом переміщення плити випробувальної машини) ми можемо «зловити» точки критичних та граничних деформацій для будь-якої з порід деревини та композитів, що використовуються в народному господарстві. Визначити точки критичних та граничних відносних деформацій за поздовжнього стиску за м'якого режиму випробувань (за приростом навантажень) практично неможливо через крихке руйнування зразків з деревини за напружень, що дорівнюють тимчасовій межі міцності матеріалу за короткочасного прикладення одноразового навантаження.

3.2. Вплив вологості на міцнісні та деформівні властивості суцільної деревини хвойних та листяних порід за поздовжнього стиску (I серія випробувань)

Випробування призм зразків-близнюків суцільної деревини хвойних (сосна, ялина, модрина) та листяних (ясен, вільха, береза) порід перерізом 30x30x120 мм на стиск вздовж волокон короткочасним одноразовим навантаженням за жорсткого режиму випробувань проводилось на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100 [246]. Дослідження

відбувалось на 3 групах зразків, які відрізнялися між собою усередненою зрівноваженою вологістю деревини (І серія випробувань):

І група зразків – зрівноважена усереднена вологість деревини хвойних та листяних порід всіх зразків - 30%, швидкість деформування – 1,5 мм/хв, вік деревини – 60 років;

ІІ група – зрівноважена усереднена вологість деревини хвойних та листяних порід всіх зразків призм - 21%, швидкість деформування – 1,5 мм/хв, вік деревини – 60 років;

ІІІ група зразків – зрівноважена усереднена вологість деревини хвойних та листяних порід - 12%, швидкість деформування – 1,5 мм/хв, вік деревини – 60 років.

Проведення випробувань проходило в приміщенні лабораторії за температури зовнішнього середовища $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ і вологості повітря $50\pm 5\%$.

3.2.1. Дослідження суцільної деревини вологістю 30 %

3.2.1.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження-деформації» за повздовжнього одноразового стиску

На основі експериментальних досліджень були побудовані повні діаграми деформування суцільної деревини хвойних та листяних порід за усередненими значеннями (рис.3.3а, рис.3.3б) та встановлені основні параметри за вологості 30%.

Зокрема, закінчення першої ділянки висхідної вітки діаграми деформування, яка має випуклість до осі деформацій, характеризується такими показниками для листяних порід (рис.3.3а): для деревини берези напруження складає $\sigma_{cl} = 5,8$ МПа (29,3% від межі міцності) за відповідних відносних деформацій $u_{cl} = 0,00077$ (12,3% від критичних відносних деформацій); для деревини вільхи за напружень $\sigma_{cl} = 3,6$ МПа (16,6% від межі міцності) відносні деформації є дещо іншими і вони рівні $u_{cl} = 0,00086$ (15,8% від критичних

деформацій деревини); для ясена - $\sigma_{cl} = 7,2\text{МПа}$ (3,2% від межі міцності деревини ясена) при цьому $u_{cl} = 0,00064$ (9,0% критичних деформацій деревини ясена).

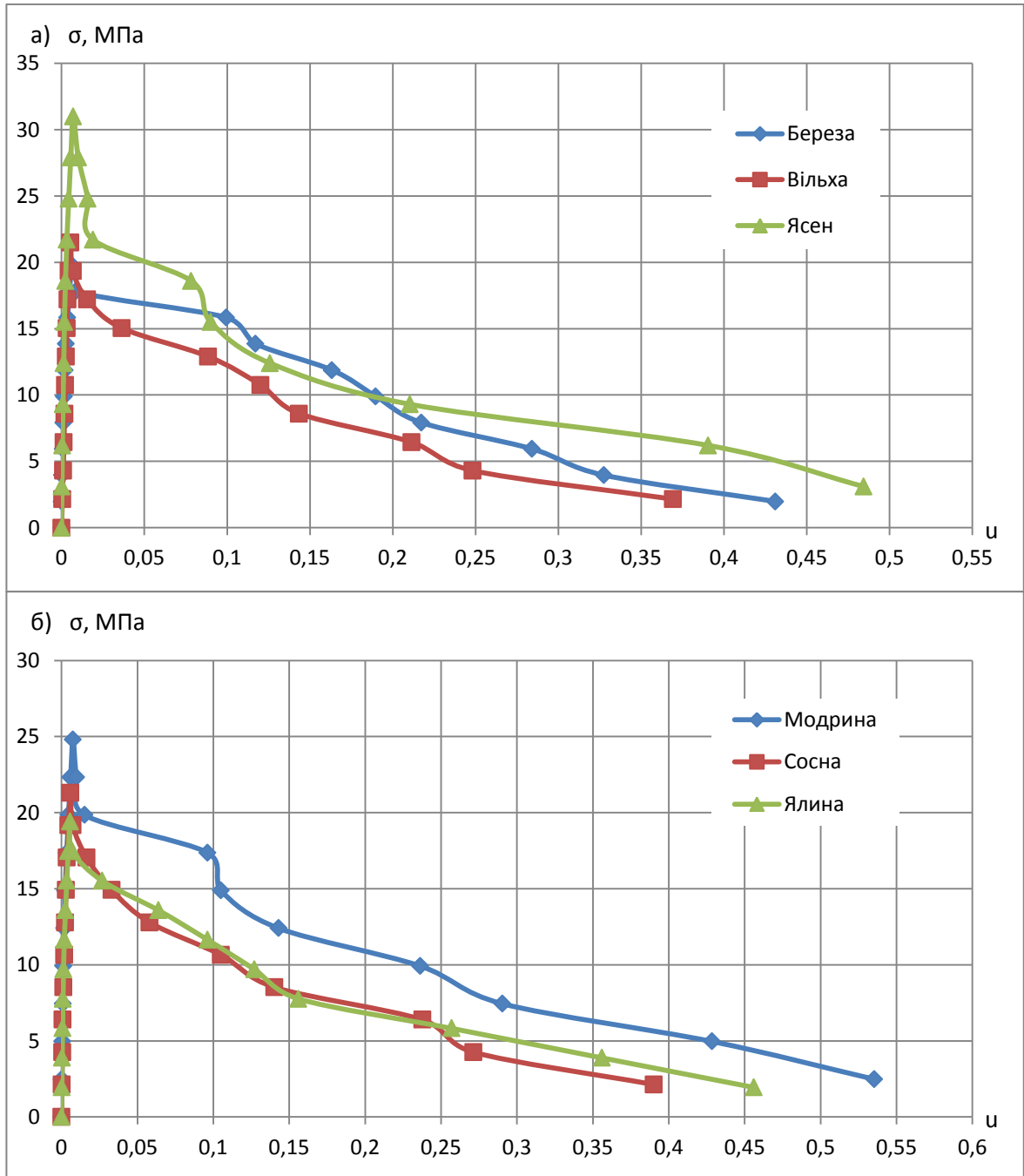


Рис. 3.3. Дійсні (повні) діаграми деформування суцільної деревини віком 60 років за вологості 30%): а) листяних порід; б) хвойних порід

На закінчення першої ділянки для хвойних порід зафіксовані наступні значення міцності та деформівності (Рис.3.3б): для деревини модрини напруження зафіксоване на позначці $\sigma_{cl}=6,3$ МПа (складає 25,4% межі міцності модрини), а відносні деформації при цьому складають $u_{cl}=0,00076$ (10,0% критичних деформацій модрини); для сосни напруження мають значення $\sigma_{cl}=6,0$ МПа (28,2% межі міцності сосни) з відповідними відносними деформаціями $u_{cl}=0,00075$ (12,9% критичних відносних деформацій сосни); для деревини ялини – $\sigma_{cl}=5,5$ МПа (28,3% від межі міцності) за відносних деформацій $u_{cl}=0,00068$ (12,0% критичних відносних деформацій ялини).

Друга ділянка характеризується стрімким збільшенням напружень та ростом відповідних нелінійних відносних деформацій, має значну кривину з випуклістю до осі напружень, при цьому діаграма досягає найвищої точки висхідної вітки (точки критичних деформацій), зокрема для листяних порід (рис.3.3а) вона є на рівні: для деревини берези максимальні напруження зафіксовані на позначці $f_{c,0,d}=19,8$ МПа за відповідних критичних деформацій $u_{c,0,d,exp}=0,00627$; для деревини вільхи максимальні напруження досягли позначки $f_{c,0,d}=21,5$ МПа, при цьому критичні деформації досягли $u_{c,0,d,exp}=0,00545$; для деревини ясена межа міцності настала за напружень $f_{c,0,d}=31,0$ МПа при зростанні відносних деформацій до $u_{c,0,d,exp}=0,00708$.

Для хвойних порід друга ділянка закінчується наступними міцнісними та деформівними показниками (Рис.3.3б): для деревини модрини максимальні напруження мають показник $f_{c,0,d}=24,8$ МПа за відповідних відносних критичних деформацій $u_{c,0,d,exp}=0,00756$; для деревини сосни максимальні напруження були $f_{c,0,d}=21,3$ МПа, а відносні критичні деформації склали $u_{c,0,d,exp}=0,00582$; для деревини ялини межа міцності була за напружень $f_{c,0,d}=19,4$ МПа за відповідних критичних відносних деформацій $u_{c,0,d,exp}=0,00565$.

Третю ділянку, яка знаходиться на спадній вітці діаграми механічного стану деревини від критичних відносних деформацій (межа міцності деревини) до точки граничних деформацій проаналізуємо їх окремо та опишемо в п.3.2.1.4.

На четвертій ділянці від точки граничних деформацій до повного руйнування зразків нам вдалося зафіксувати наступні значення напружень опору деревини стиску вздовж волокон та відповідне накопичення остаточних відносних деформацій деревини, зокрема, для листяних порід (рис.3.3а): для деревини берези залишкова міцність була на рівні $\sigma_{c,fin}= 2,0$ МПа, а сумарні відносні деформації досягли $u_{c,fin}=0,4310$; для вільхи залишкова міцність лишилася на рівні $\sigma_{c,fin}=2,2$ за накопичення відносних сумарних деформацій - $u_{c,fin}=0,3693$; у ясена залишкова міцність - $\sigma_{c,fin}= 3,1$ МПа за відносних деформацій $u_{c,fin}=0,4844$.

Для хвойних порід маємо такі значення міцності та деформівності (рис.3.3б): модрина залишкова міцність була на рівні $\sigma_{c,fin}= 2,5$ МПа, а відносні деформації - $u_{c,fin}=0,5354$; сосни залишкова міцність склала $\sigma_{c,fin}= 2,1$ МПа при цьому відносні деформації досягли позначки $u_{c,fin}=0,3902$; ялини залишкова міцність - $\sigma_{c,fin}= 1,9$ МПа, а відносні деформації - $u_{c,fin}=0,4561$.

3.2.1.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) за повздовжнього одноразового стиску

За результатами експериментальних досліджень були отримані діаграми «Е-η» (січний модуль – рівень напружень) (рис.3.4а, рис.3.4б) хвойних та листяних порід деревини.

На основі побудованих прямих регресії визначені початкові модулі пружності та модулі деформацій всіх досліджуваних порід вологістю 30% за методикою наведеною в п.2.11.

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії суцільної деревини у віці 60 років за вологості 30% заносимо до табл.3.1.

Отже, були отримані наступні показники початкового модуля пружності за вологості 30%:

– для листяних порід (рис.3.4а): берези $E_0=10000$ МПа, вільхи $E_0=7500$ МПа, ясена $E_0=13600$ МПа;

– для хвойних порід (рис.3.4б): модрина $E_0=10600$ МПа, сосни $E_0=9700$ МПа, ялини $E_0=10700$ МПа.

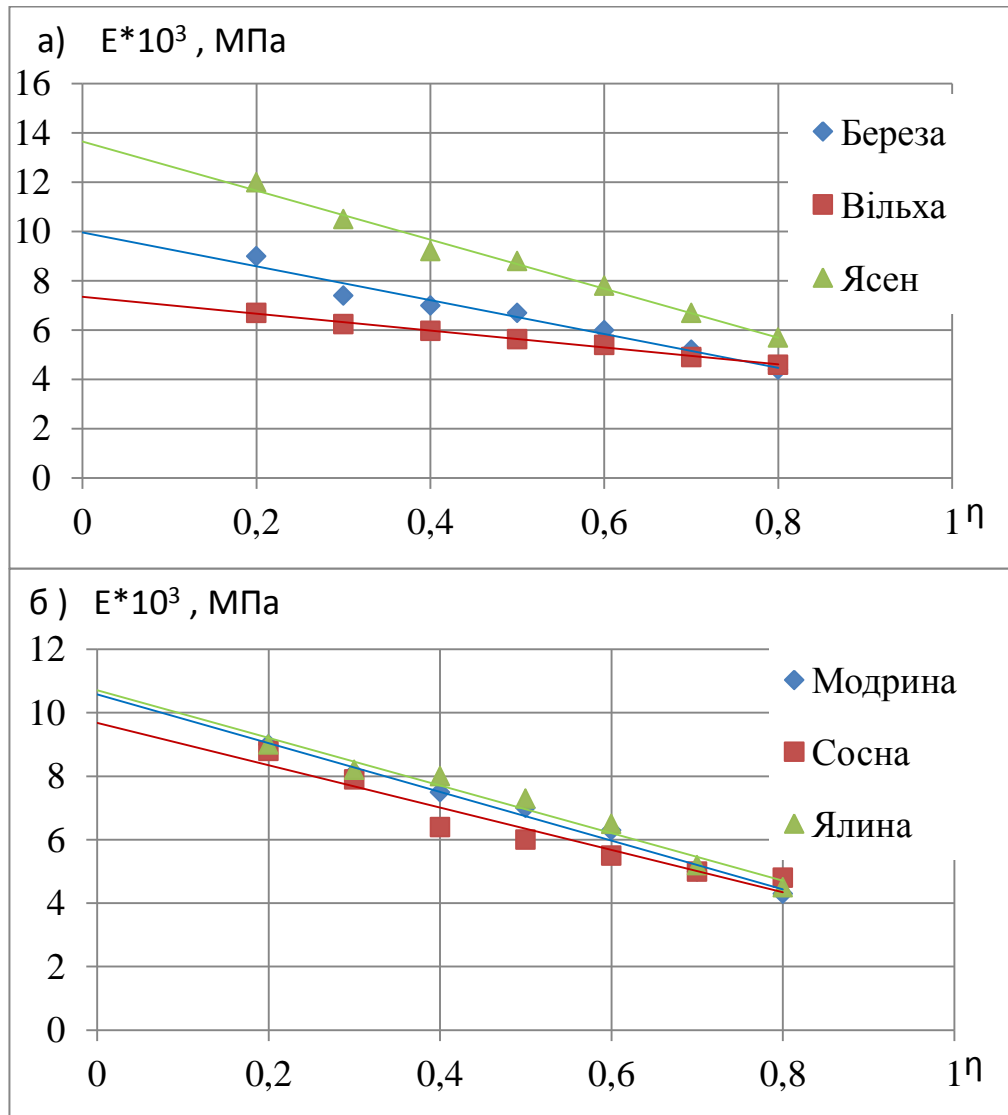


Рис.3.4. Діаграми «E- η » (січний модуль – рівень напружень) різних порід суцільної деревини у віці 60 років за вологості 30%: а) листяних; б) хвойних

На нашу думку, цікавим фактом є зміна модуля деформацій. За вологості 30% січний модуль дуже різко зменшується. Так з початкового модуля пружності до рівня напружень $0,8f_{c,0,d}$ зменшення становило: для зразків берези в 2,27 раза; вільхи в 1,62 раза; ясена в 2,43 раза; модрина в 2,41 раза; сосни в 2,20 раза; ялини в 2,28 раза. Таке стрімке зменшення модуля деформацій

можливо пояснити в загальній відносній деформації домінуванням складової пластичних деформацій над складовою пружних за вологості 30%. В цьому ми переконаємось в наступних пунктах даного розділу.

Таблиця 3.1

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії суцільної деревини у віці 60 років за вологості 30%

Назва зразка	Кореляційне рівняння	r	m_r	r/m_r	$V, \%$
БС-30-60	$E' = 9,957 \cdot (1 - 0,346 \eta)$	0,981	0,015	67	3,58
ВС-30-60	$E' = 7,457 \cdot (1 - 0,173 \eta)$	0,997	0,002	405	1,01
ЯсС-30-60	$E' = 13,644 \cdot (1 - 0,321 \cdot \eta)$	0,993	0,005	188	2,37
МС-30-60	$E' = 10,582 \cdot (1 - 0,310 \cdot \eta)$	0,992	0,006	164	3,26
СС-30-60	$E' = 9,682 \cdot (1 - 0,314 \cdot \eta)$	0,963	0,028	35	6,15
ЯлС-30-60	$E' = 10,707 \cdot (1 - 0,387 \cdot \eta)$	0,984	0,012	84	4,05

3.2.1.3. Критичні деформації суцільної деревини за поздовжнього одноразового стиску

На основі проведених експериментальних досліджень та повних діаграм деформування «напруження–деформації» суцільної деревини з показником вологості 30% (рис.3.4а, рис.3.4б) визначено критичні деформації $u_{c,0,d,exp}$ всіх зразків окремо для кожної з груп порід. Усередненні значення критичних відносних деформацій деревини за поздовжнього стиску одноразовим короткочасним навантаженням заносимо до табл.3.2.

Критичні відносні деформації суцільної деревини листяних та хвойних порід вологістю 30% $u_{c,0,d,th}$ знаходимо теоретичним шляхом за формулою (2.9) (табл.3.2). При цьому коефіцієнт становить $c_1 = 8,70 \cdot 10^{-6} \text{ (МПа)}^{-2}$ для будь-яких листяних та хвойних порід вологістю 30%. Оскільки формула (2.9) має дві

складові – пружну $u_{c,el,th}$ та пластичну $u_{c,pl,th}$, то ці дві величини також заносимо до даної таблиці. Дані показники необхідні в подальших дослідженнях, так як будуть використані для аналізу зміни пружно-пластичних властивостей досліджуваних порід деревини.

Таблиця 3.2

Значення експериментальних та теоретичних показників усереднених критичних деформацій суцільної деревини вологістю 30%

№п/п	Порода деревини	К-сть призм шт.	Переріз зразків, мм	$f_{c,0,d}$ МПа	E_0 , МПа	$u_{c,0,d,exp}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,0,d,th}$
1	Береза	6	30x30x120	19,8	10000	0,00627	0,00198	0,00341	0,00539
2	Вільха	6	30x30x120	21,5	7500	0,00545	0,00287	0,00402	0,00689
3	Ясен	6	30x30x120	31,0	13600	0,00708	0,00228	0,00660	0,00888
4	Модрина	6	30x30x120	24,8	10600	0,00756	0,00182	0,00587	0,00769
5	Сосна	6	30x30x120	21,3	9700	0,00582	0,00220	0,00394	0,00614
6	Ялина	6	30x30x120	19,4	10700	0,00565	0,00181	0,00328	0,00509

Проведемо аналіз отриманих експериментальних та теоретичних результатів досліджень за всіма 36-ма зразками хвойних та листяних порід суцільної деревини вологістю 30% (рис.3.5), (табл.3.3) методами математичної статистики.

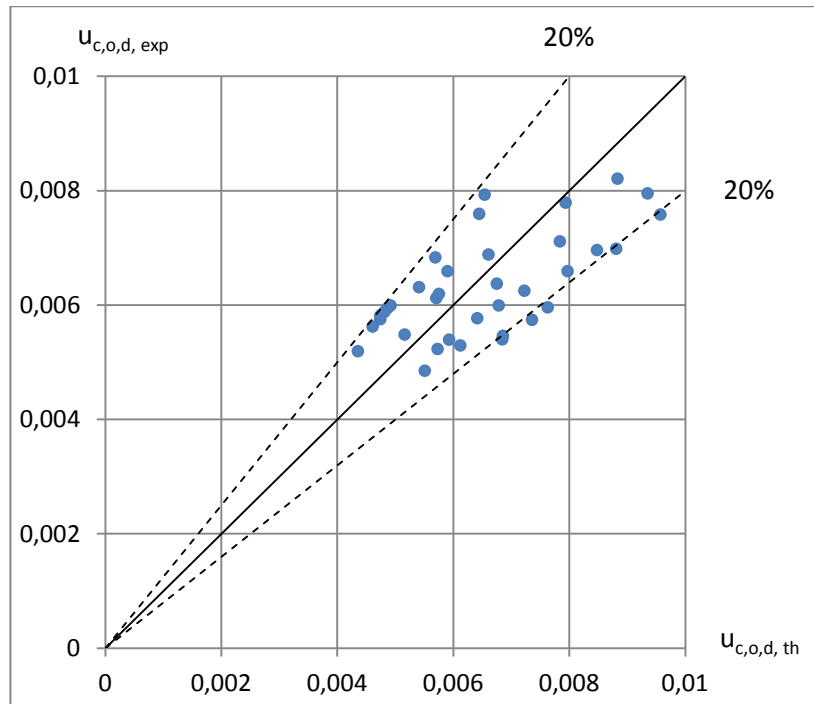


Рис.3.5. Відхилення теоретичних значень критичних деформацій деформування за формулою автора (2.9) від експериментальних суцільної деревини листяних та хвойних порід вологістю 30%

Таблиця 3.3

Статистична оцінка формули автора (2.9) з визначення критичних деформацій суцільної деревини листяних та хвойних порід вологістю 30%

Формула для визначення критичних деформацій	Відхилення від експериментальних значень, %				
	$\Delta_{u,1}$	$\Delta_{u,2}$	Δ_u	σ_u	$\Delta_{u,max}$
$u_{c,0,d} = f_{c,0,d} / E_c + c_1 \cdot f_{c,0,d}^2$, де $c_1 = 8,70 \cdot 10^{-6} \text{ (МПа)}^{-2}$	-22,25	22,09	0,60	16,5	22,25
36 зразків. $\Delta_{u,1}$, $\Delta_{u,2}$ – нижня та верхня межі відхилень від експериментальних значень; Δ_u , σ_u – середньоарифметичні та стандартні значення цих відхилень; $\Delta_{u,max}$ – максимальне з $\Delta_{u,1}$ і $\Delta_{u,2}$.					

Отже, аналізуючи рис.3.5 та дані приведені в табл.3.3 приходимо до висновку, що збіжність теоретичних та експериментальних значень критичних деформацій є задовільною незалежно від породи деревини. Максимальна розбіжність близька складає $\Delta_{u,\max}=22,25\%$.

Також, однією з переваг запропонованої функції (2.9) є те, що коефіцієнт c_1 за вологості 30% є однаковим за значенням для всіх листяних та хвойних порід деревини.

3.2.1.4. Граничні відносні деформації суцільної деревини за повздовжнього одноразового короткочасного стиску

Для встановлення відносних граничних деформацій всіх досліджуваних листяних та хвойних порід деревини з усередненою вологістю 30% використаємо методику розроблену та наведену в п.2.9. Для цього визначаємо коефіцієнти поліному (2.5) w_1, w_2, w_3, w_4 запропонованої функції, встановлюємо відносні критичні деформації розтягу $u_{t,0,d}$ згідно рис.1.2 [291] та стиску $u_{c,0,d}$ вздовж волокон. Також використовуємо значення встановленого раніше початкового модуля пружності деревини (табл.3.4).

За визначеними даними будуємо діаграми «момент–кривина» для всіх досліджуваних порід деревини з вологістю 30% (рис.3.6а, рис.3.6б) на основі запропонованого алгоритму (рис.2.20), а згодом трансформуємо їх в діаграми «момент–деформації» (рис.3.7а, рис.3.7б).

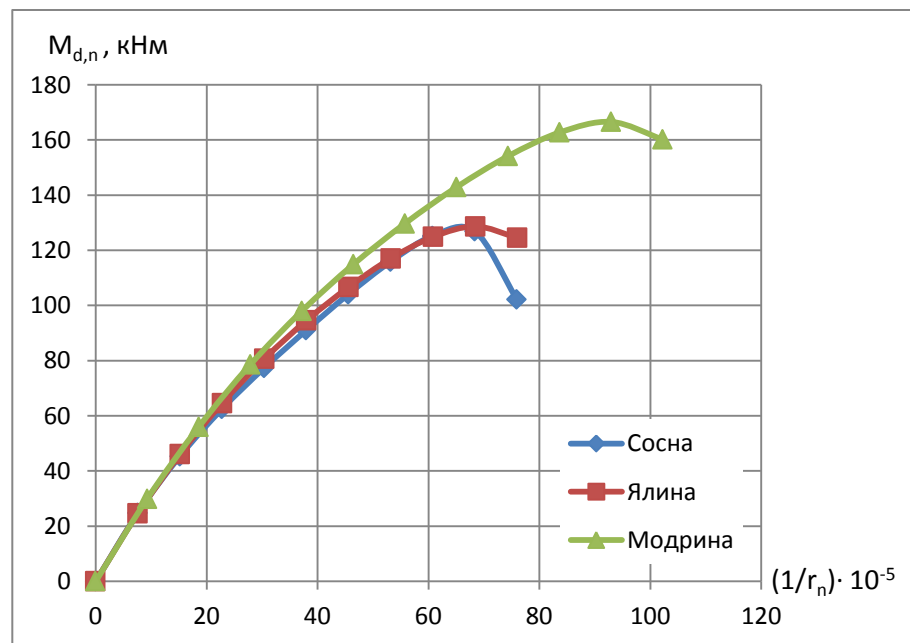
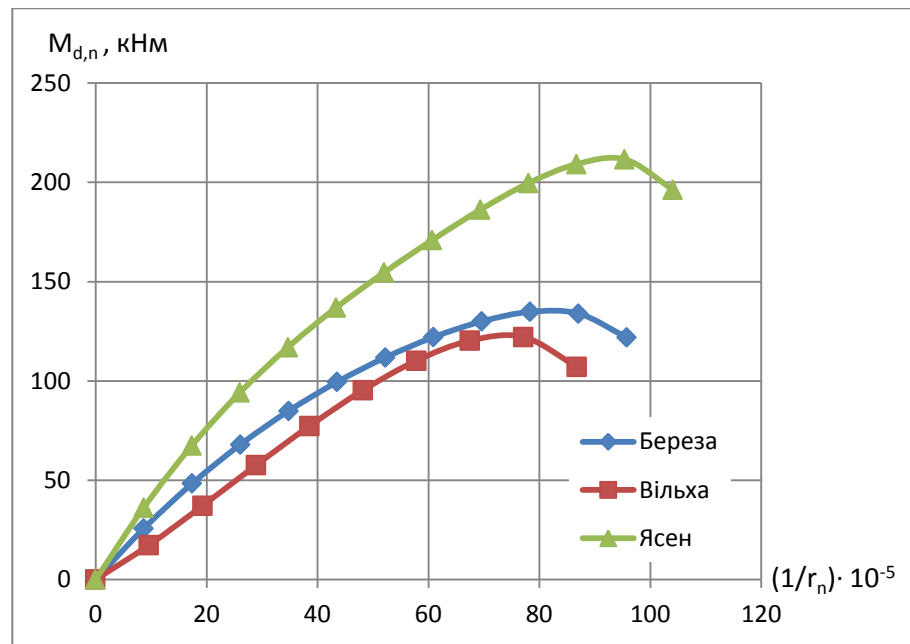


Рис.3.6. Діаграми «момент–кривина» за вологості 30% відповідно:
 а) листяних порід; б) хвойних порід

Граничними будуть ті відносні деформації деревини $u_{c,u}$ в крайніх волокнах розрахункового поперечного перерізу елемента з деревини, що працює на поперечний згин, за максимальних розрахункових навантажень, які створює максимальний згинальний момент $M_{d,n,max}$.

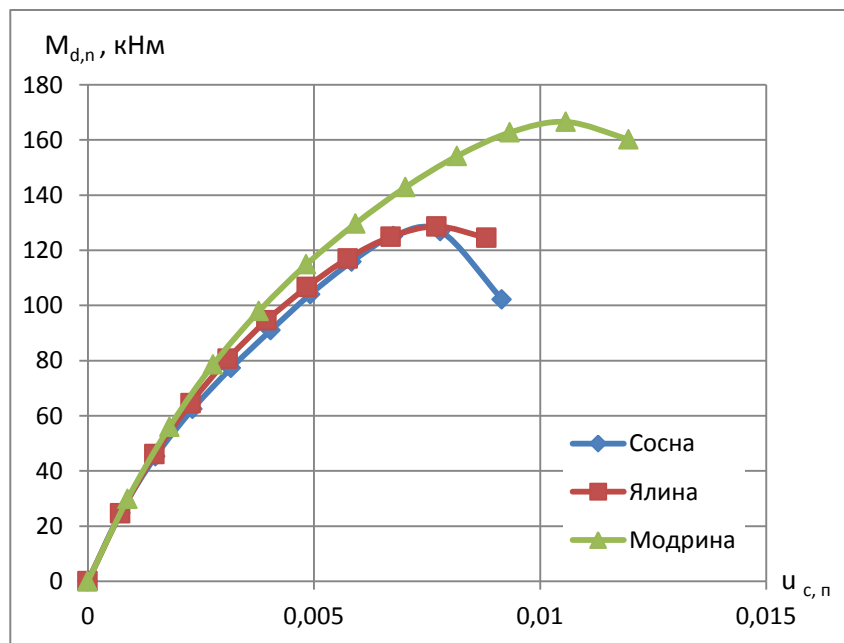
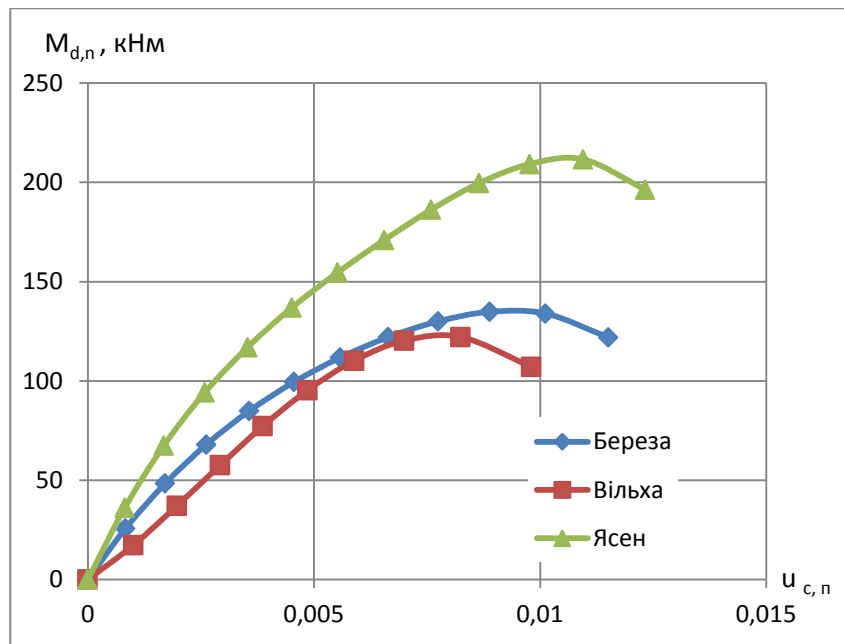


Рис.3.7. Трансформація діаграм «момент-кривина» в діаграми «момент-деформації» за вологості 30% відповідно: а) листяних порід; б) хвойних порід

Розрахунок значень вказаних показників для деревини різних порід за вологості 30% приводимо в табличній формі (табл. 3.4).

До визначення усереднених граничних деформацій суцільної деревини за вологості 30%

Породи деревини	Коефіцієнти поліному (2.5)				$u_{c,0,d}$	$u_{t,0,d}$	E_0 , МПа	$u_{c,u}$
	w_1	w_2	w_3	w_4				
Береза	8592	-10149	6806	-2091	0,00627	0,00940	10000	0,00889
Вільха	3185	6544	-7139	1359	0,00545	0,01190	7500	0,00825
Ясен	12702	-19641	17029	-5711	0,00708	0,00853	13600	0,01096
Модрина	9615	-13804	11473	-4003	0,00756	0,00917	10600	0,01057
Сосна	9980	-17376	18306	7252	0,00582	0,00856	9700	0,00780
Ялина	9662	-12877	10311	-3663	0,00565	0,00804	10700	0,00771

Для подальшого полегшення розрахунків конструкцій та елементів з суцільної деревини всіх порід доцільно встановити співвідношення граничних деформацій до критичних (експериментальні значення):

– для деревини берези $u_{c,u}=1,42u_{c,0,d}$;

– вільхи $-u_{c,u}=1,51u_{c,0,d}$;

– ясена - $u_{c,u}=1,55u_{c,0,d}$;

– модрини - $u_{c,u}=1,40u_{c,0,d}$;

– сосни - $u_{c,u}=1,34u_{c,0,d}$;

– ялини - $u_{c,u}=1,39u_{c,0,d}$.

Збільшення відносних граничних деформацій по відношенню до критичних коливається в межах від $u_{c,u}=1,34u_{c,0,d}$ (для сосни) до $u_{c,u}=1,55u_{c,0,d}$ (для ясена).

3.2.1.5. Апроксимація діаграм механічного стану деревини за одноразового повздовжнього стиску

Для встановлення достовірності запропонованої функції (2.5) проведемо апроксимацію діаграм механічного стану всіх порід деревини, як для повних

діаграм деформування, так і з обмеженням в точці граничних деформацій за вологості 30%. Для цього необхідно визначити всі коефіцієнти поліному (2.5) w_1, w_2, w_3, w_4 . Для діаграми деформування з обмеженням в точці граничних деформацій отримані результати наведені в табл.3.5, а для повної – в табл. 3.6. На рис.3.8а побудовані діаграми деформування деревини вільхи з обмеженням в точці граничних деформацій за експериментальними значеннями та за функцією (2.5), а на рис.3.8б – сосни. Для інших порід деревини носили подібний характер.

Таблиця 3.5.

Результати апроксимації діаграм листяних та хвойних порід деревини за вологості 30% з обмеженням в точці граничних деформацій

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (2.5) та дослідних значень
	w_1	w_2	w_3	w_4	
Береза	8571,37	-9900,09	6062,91	-1576,30	0,999
Вільха	3013,70	7707,96	-9444,66	2671,57	0,999
Ясен	12675,78	-19329,80	16125,34	-5092,79	0,999
Модрина	9587,63	-13464,02	10438,78	-3281,96	0,997
Сосна	9933,70	-16872,28	17001,65	-6403,27	0,998
Ялина	9639,09	-12597,47	9475,14	-3083,13	0,998

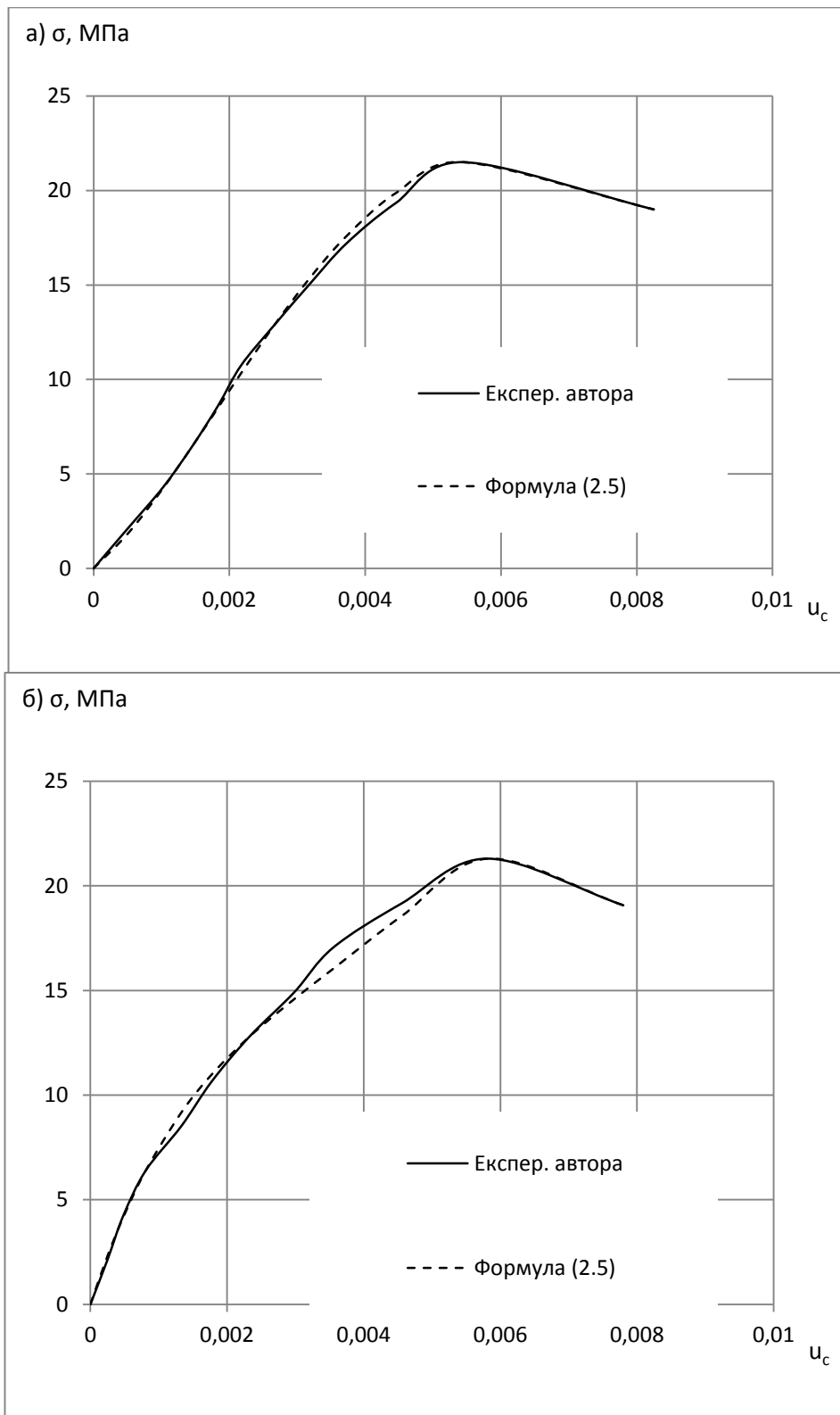


Рис.3.8. Діаграми деревини з обмеженням в точці граничних деформацій побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) за вологості 30%: а) вільхи; б) сосни

Збіжність результатів експериментальних даних з теоретичними є хорошою та в більшій мірі прямує до 1 (табл.3.5).

Таблиця 3.6

Результати апроксимації повних діаграм листяних та хвойних порід деревини за вологості 30%

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (3.9) та дослідних значень
	W_1	W_2	W_3	W_4	
Береза	7831,29	-4890,04	218,81	-2,17	0,952
Вільха	5657,52	-1803,60	92,02	-0,98	0,976
Ясен	10402,19	-6549,71	532,47	-6,42	0,950
Модрина	8218,73	-5265,42	321,62	-3,52	0,968
Сосна	7075,27	-3640,14	227,27	-2,60	0,981
Ялина	8547,59	-5395,39	284,12	-2,71	0,979

Дійсні (повні) діаграми механічного стану деревини побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) для деревини вільхи наведені на рис.3.9а, а для – сосни на рис.3.9б. Для інших порід деревини носили схожий характер.

Збіжність даних результатів за відносної вологості 30% є також досить високою та знаходиться в межах $\eta=0,950\dots0,981$.

Отже, запропонована функція для теоретичної побудови діаграм деформування деревини за одноразового короткочасного стиску вздовж волокон (2.5) в повній мірі підходить для апроксимації, як повних діаграм деформування зразків конструкційних розмірів вологістю 30%, так і з обмеженням в точці граничних деформацій.

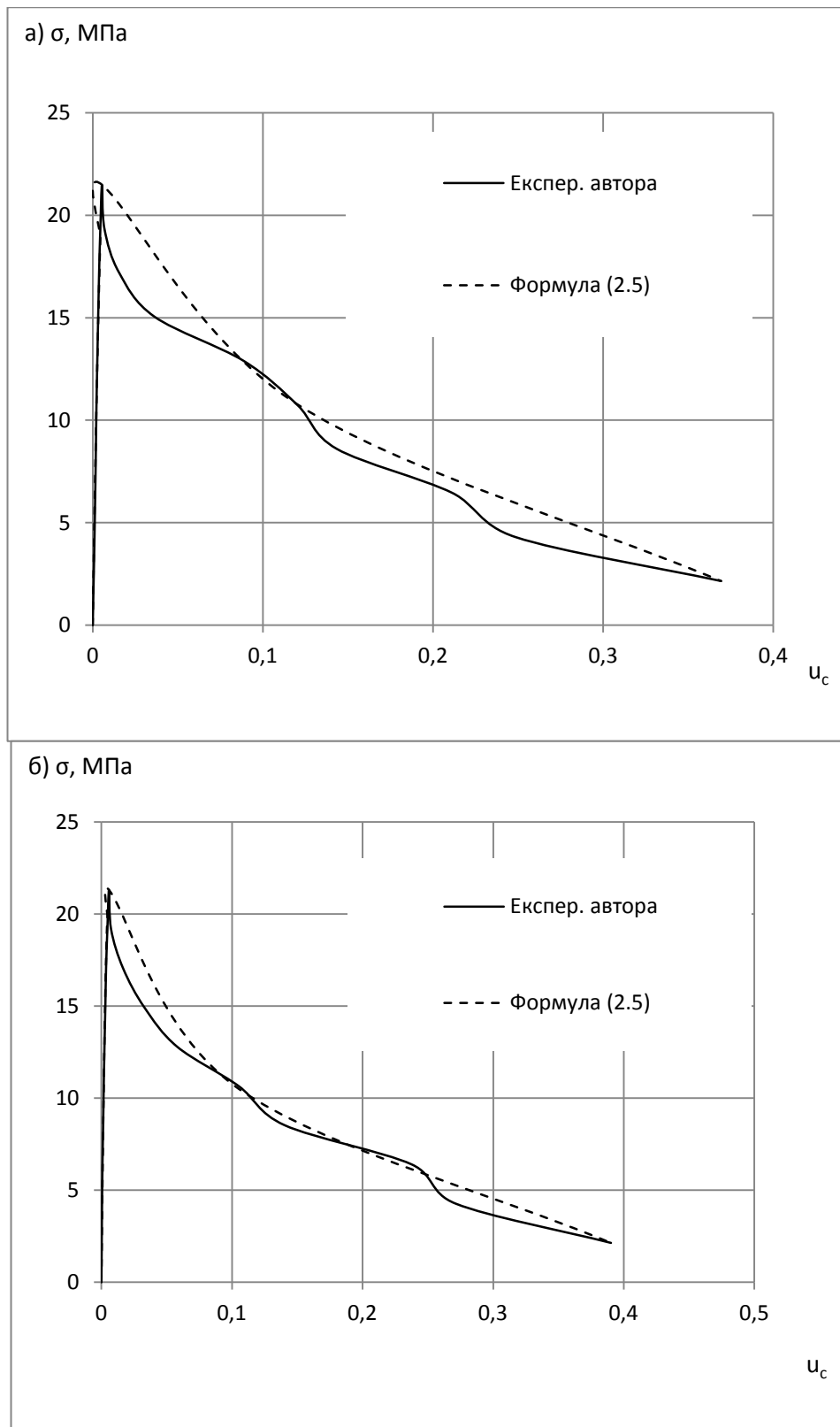


Рис.3.9. Дійсні (повні) діаграми деревини побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) за вологості 30%: а) вільхи; б) сосни

3.2.2. Дослідження суцільної деревини вологістю 21%

Аналіз будемо проводити зі зразками вологістю 30% віком 60 років.

3.2.2.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c » за повздовжнього одноразового стиску

За результатами експериментальних досліджень призм із суцільної деревини листяних порід (берези, вільхи, ясена) та хвойних порід (сосни, ялини, модрина) на стиск вздовж волокон одноразовим короточасним навантаженням були побудовані повні діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » (рис.3.10а, рис.3.10б) за усередненої вологості 21% за жорсткого режиму випробувань (з постійним в часі приростом переміщень плити випробувальної машини).

Проведемо детальний аналіз показників міцності та деформівності на чотирьох ділянках діаграм деформування деревини за осьового стиску в порівнянні з вологістю 30%.

Перша ділянка має явно виражену випуклість до осі деформацій. На першій ділянці для листяних порід (рис.3.11а) маємо наступну картину: для деревини берези напруження зростають в 1,17 раза ($\sigma_{cI} = 6,8$ МПа), а відносні деформації зменшуються в 1,08 раза ($u_{cI} = 0,00071$); для деревини вільхи напруження збільшуються в 1,22 раза ($\sigma_{cI} = 4,4$ МПа), а деформації зменшуються фактично в тому ж діапазоні в 1,09 раза ($u_{cI} = 0,00079$); для деревини ясена напруження збільшуються в 1,11 раза ($\sigma_{cI} = 8,0$ МПа) при цьому деформівність зразків дещо зменшується та досягає позначки $u_{cI} = 0,00059$.

На цій же ділянці для хвойних порід (рис.3.10б) спостерігається та сама тенденція: зокрема для зразків деревини модрина напруження зростають в 1,24 раза та досягають позначки $\sigma_{cI} = 7,8$ МПа, а повздовжні відносні деформації незначно зменшуються в 1,06 раза ($u_{cI} = 0,00072$); для сосни напруження на даній ділянці дещо збільшуються в 1,15 раза ($\sigma_{cI} = 6,9$ МПа), деформівність

зменшується в 1,12 рази; для деревини ялини напруження зростають в 1,21 рази ($\sigma_{cl} = 6,7$ МПа), а деформації зразка є практично незмінними.

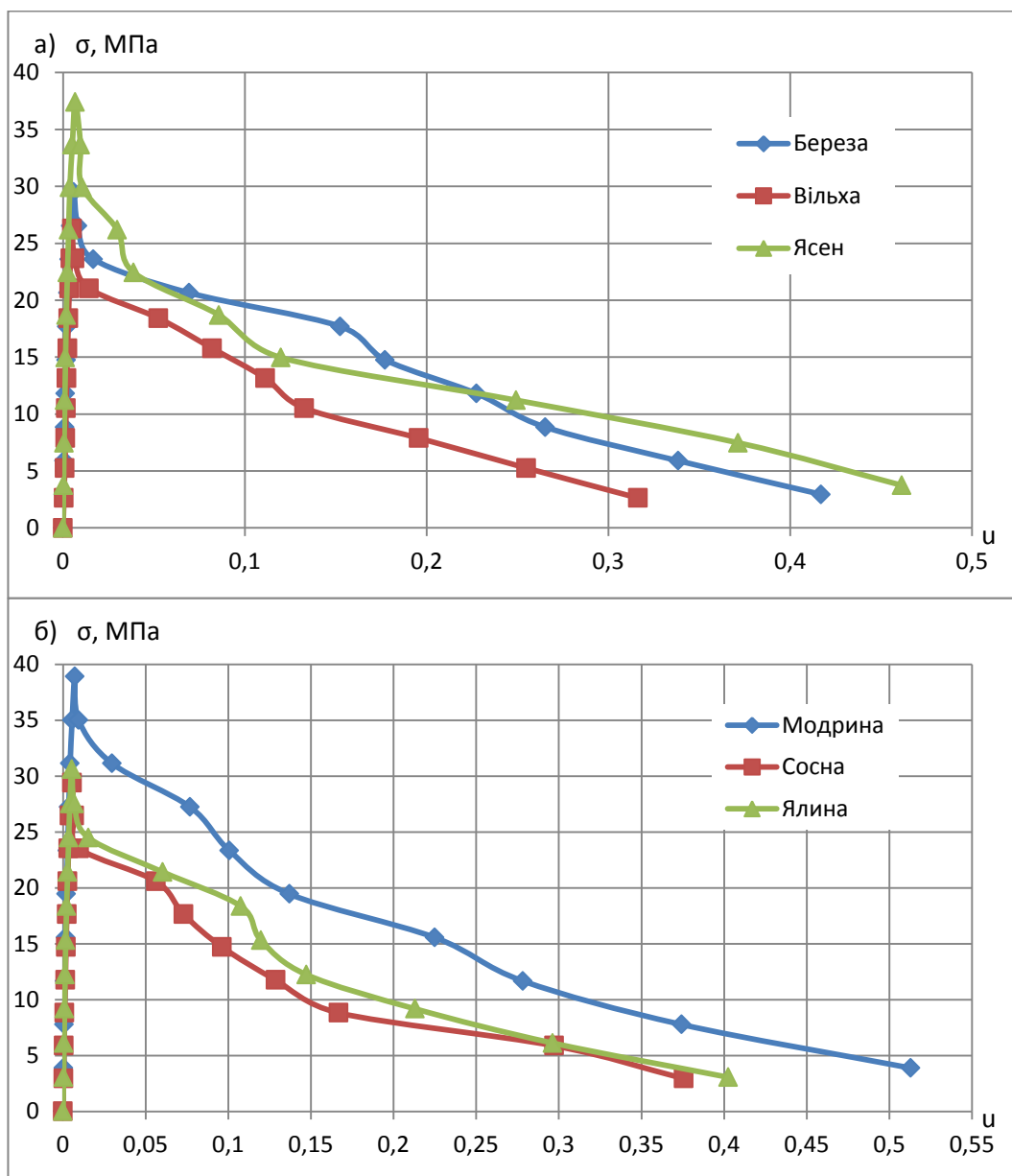


Рис.3.10. Дійсні (повні) діаграми деформування суцільної деревини віком 60 років за вологості 21%: а) листяних порід; б) хвойних порід

Аналізуючи, в цілому, першу ділянку діаграм механічного стану всіх порід за вологості 21% приходимо до висновку, що перша ділянка закінчується за напружень деревини, які збільшилися на 11–24%, а деформівність зменшилася на 2–10%, в порівнянні з деревиною вологістю 30%.

Друга ділянка діаграми « $\sigma_c - u_c$ », яка також знаходиться на висхідній вітці, носить такий же характер, що і для першої, але має дещо інші показники збільшення міцності та зменшення деформівності.

Отже, експериментальні значення листяних порід (закінчення II ділянки, вершина діаграми «напруження σ_c – деформації u_c ») за максимальних напружень та критичних деформацій мають наступні значення (рис.3.10а): для деревини берези напруження значно зростають в 1,49 раза та досягає відмітки $f_{c,0,d}=29,5$ МПа, деформівність зразків зменшується в 1,06 раза ($u_{c,0,d,exp}=0,00593$); межа міцності вільхи також збільшуються в 1,22 раза ($f_{c,0,d}=26,3$ МПа), а критичні деформації зменшуються в 1,08 раза до позначки $u_{c,0,d,exp}=0,00504$; міцність деревини ясена також зростає в 1,21 раза до напружень $f_{c,0,d}=37,4$ МПа, при цьому деформівні показники зменшуються в 1,06 раза і складають $u_{c,0,d,exp}=0,00671$.

На другій ділянці повної діаграми «напруження-деформації» міцнісні та деформівні показники хвойних порід становлять (рис.3.10б): максимальні напруження деревини модрина зросли в 1,57 раза та досягли відмітки $f_{c,0,d}=38,9$ МПа, критичні відносні деформації спадають в 1,05 раза ($u_{c,0,d,exp}=0,00756$); межа міцності сосни за вологості 21% складає $f_{c,0,d}=29,4$ МПа, що в 1,38 раза більше ніж за вологості 30%, а деформівні показники зменшуються практично в тому ж діапазоні $u_{c,0,d,exp}=0,00549$; для деревини ялини граничне найбільше напруження зростає в 1,58 рази, а деформівність є близькою за значенням з показниками зразків сосни $u_{c,0,d,exp}=0,00532$.

Отже, на другій ділянці міцнісні параметри листяних та хвойних порід збільшуються в межах від 21% до 58% в порівнянні з вологістю 30%. Деформівність несуттєво зменшується в одному діапазоні до 8%.

Третю ділянку детально розглянемо в п.3.2.2.4.

Остання четверта ділянка характеризується гіпер різким збільшення відносних деформацій деревини, подібно, як і за вологості 30%, на спадній вітці діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » (рис.3.10а, рис.3.10б). Накопичення відносних деформацій, які вдалося зафіксувати для всіх порід, що

досліджувалися, були приблизно за напружень, які рівні $0,1f_{c,0,d}$. Після цього проводилося розвантаження всіх зразків. Отже, остаточні показники відносних деформацій деревини листяних та хвойних порід, які вдалося нам зафіксувати, мали наступні значення: деревини берези - $u_{c,fin}=0,4169$ (в 1,03 раза менше); вільхи $u_{c,fin}=0,3163$ (в 1,17 раза менше); ясена $u_{c,fin}=0,4614$ (в 1,05 раза менше); модрина $u_{c,fin}=0,5129$ (в 1,04 раза менше); сосни $u_{c,fin}=0,4026$ (в 1,04 рази менше); ялини $u_{c,fin}=0,4169$ (в 1,13 рази менше).

В цілому, на даній ділянці спостерігається зменшення деформівності суцільної деревини в межах від 3% до 17% в порівнянні з усередненою вологістю в 30%.

Приходимо до висновку, що висушування деревини до вологості 21% сприяє зміні основних показників діаграми деформування зразків суцільної деревини листяних та хвойних порід на всіх її ділянках, зокрема значно збільшує міцнісні параметри та зменшує деформівні.

3.2.2.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) за стиску вздовж волокон

Аналогічним чином, побудуємо діаграми «E- η » (січний модуль – рівень напружень) для деревини вологістю 21% (рис.3.11а, рис.3.11б), на основі яких визначимо початкові модулі пружності та модулі деформацій всіх досліджуваних порід.

Отже, були отримані наступні показники початкового модуля пружності за вологості 21%:

– для листяних порід (рис.3.11а): берези $E_0=10900$ МПа (збільшився в 1,09 раза), вільхи $E_0=8800$ МПа (в 1,17 раза), ясена $E_0=14700$ МПа (в 1,08 раза);

– для хвойних порід (рис.3.11б): модрина $E_0=12000$ МПа (в 1,13 раза більше), сосни $E_0=11000$ МПа (в 1,13 раза), ялини $E_0=12100$ МПа (в 1,14 раза).

Приходимо до висновку, що початковий модуль пружності деревини всіх досліджуваних порід при зменшенні вологості від 30% до 21% обов'язково збільшується в межах від 8% до 17%.

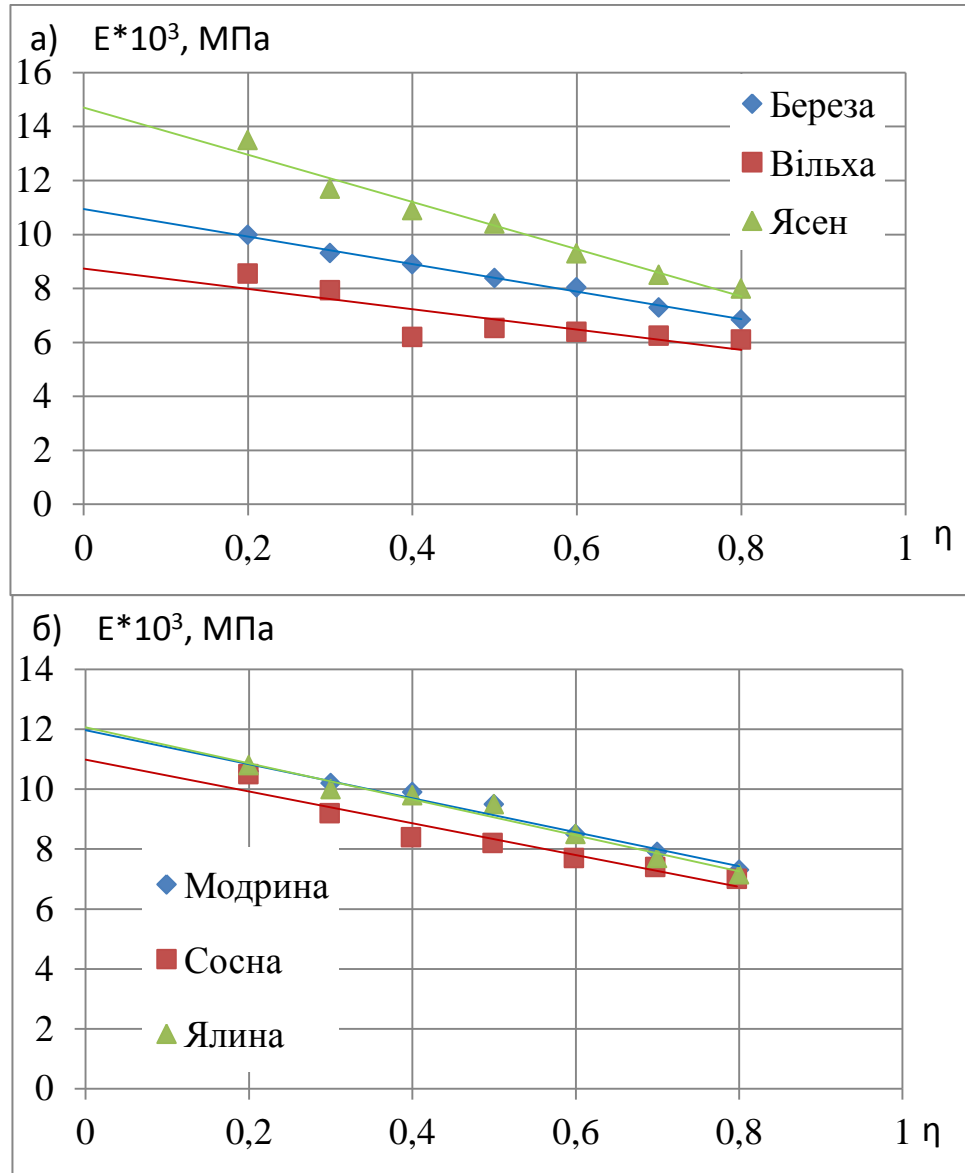


Рис.3.11. Діаграми «Е–η» (січний модуль – рівень напружень) різних порід суцільної деревини у віці 60 років за вологості 21%: а) листяних; б) хвойних

Проаналізуємо зміну модуля деформацій таким же чином, як і за вологості 30%. Також спостерігалось зменшення величини січного модуля, але дещо в іншому діапазоні: для деревини берези в 1,60 раза; вільхи в 1,53 раза; ясена в 1,91 раза; модрини в 1,57 раза; сосни в 1,64 раза; ялини в 1,68 раза.

Зменшення інтервалу зміни модуля деформацій (січного) пояснюється фактичним вирівнюванням складової пластичних та складової пружних деформацій в загальному показнику відносних деформацій.

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії суцільної деревини у віці 60 років за вологості 21% представлені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії суцільної деревини у віці 60 років за вологості 21%

Назва зразка	Кореляційне рівняння	r	m_r	r/m_r	$V, \%$
БС-30-60	$E' = 10,947 \cdot (1 - 0,173 \cdot \eta)$	0,997	0,002	404	1,01
ВС-30-60	$E' = 8,757 \cdot (1 - 0,106 \cdot \eta)$	0,886	0,068	11	3,81
ЯсС-30-60	$E' = 14,704 \cdot (1 - 0,232 \cdot \eta)$	0,985	0,011	15	2,77
МС-30-60	$E' = 10,986 \cdot (1 - 0,180 \cdot \eta)$	0,958	0,031	31	3,51
СС-30-60	$E' = 11,968 \cdot (1 - 0,146 \cdot \eta)$	0,986	0,011	91	2,09
ЯлС-30-60	$E' = 12,073 \cdot (1 - 0,197 \cdot \eta)$	0,984	0,012	84	2,35

3.2.2.3. Критичні деформації суцільної деревини за вологості 21%

За експериментальними діаграмами «напруження σ_c – деформації u_c » суцільної деревини з показником вологості 21% $u_{c,0,d,exp}$ (рис.3.10а, рис.3.10б) визначимо усереднені критичні відносні деформації всіх зразків окремо для кожної породи.

Значення повних критичних деформацій $u_{c,0,d,th}$ деревини листяних та хвойних порід вологістю 21% знаходимо, аналогічним чином, як і за вологості 30%, теоретичним шляхом за формулою (2.9) і заносимо до табл.3.8. При цьому коефіцієнт c_1 є однаковим для будь-яких листяних та хвойних порід вологістю

21% і становить $c_1 = 2,69 \cdot 10^{-6}$ (МПа)⁻². Також заносимо до даної таблиці дві складові деформування – пружну $u_{c,el,th}$ та пластичну $u_{c,pl,th}$.

Таблиця 3.8

Значення експериментальних та теоретичних показників усереднених критичних відносних деформацій суцільної деревини вологістю 21%

№п/п	Порода деревини	К-сть призм шт.	Переріз зразків, мм	$f_{c,0,d}$ МПа	E_0 , МПа	$u_{c,0,d,exp}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,0,d,th}$
1	Береза	6	30x30x120	29,5	10900	0,00593	0,00271	0,00234	0,00505
2	Вільха	6	30x30x120	26,3	8800	0,00504	0,00299	0,00186	0,00485
3	Ясен	6	30x30x120	37,4	14700	0,00671	0,00254	0,00377	0,00631
4	Модрина	6	30x30x120	38,9	12000	0,00717	0,00324	0,00407	0,00731
5	Сосна	6	30x30x120	29,4	11000	0,00549	0,00267	0,00233	0,00500
6	Ялина	6	30x30x120	30,6	12100	0,00532	0,00253	0,00252	0,00505

Таким чином значення критичних деформацій деревини за вологості 21%, визначених за формулою (2.9), зменшилися в порівнянні з тими ж показниками за вологості 30% (табл. 3.8): берези в 1,07 раза; вільхи в 1,42 раза; ясена в 1,41 раза; модрини в 1,05 раза; сосни в 1,22 раза; ялини фактично не змінилися.

Також проведемо окремий аналіз пружної та пластичної складової критичних деформацій, оскільки формула (2.9) дозволяє нам це зробити.

Таким чином, пружна складова відносних критичних деформацій понесла наступні зміни: для берези збільшилася в 1,37 раза; для вільхи – в 1,04 раза; ясена – в 1,11 раза; модрини – в 1,78 раза; сосни – в 1,21 раза; ялини – в 1,37 раза.

А пластична складова в цілому також зменшилася, як для хвойних, так і листяних порід деревини: для берези – в 1,46 раза; вільхи – в 2,16 раза; ясена – в 1,75 раза; модрини – в 1,44 раза; сосни – в 1,69 раза; ялини – в 1,30 раза.

Для критичних відносних деформаціях, які визначені експериментальним та теоретичним шляхом, відбувається характерне зменшення значень за

вологості 21% в порівнянні з 30%, але з різними діапазонами змін. В той же час складові критичних деформацій функції (2.9) змінюється по різному: пружна – збільшується, пластична – зменшується.

Також спостерігаємо, що за вологості 21% складові формули (2.9) є приблизно однаковими між собою, на відміну від деревини вологістю 30%, де пластична складова є набагато більшою за пружну.

Проведемо статистичний аналіз отриманих експериментальних та теоретичних результатів досліджень за всіма 36-ма зразками хвойних та листяних порід суцільної деревини вологістю 21% (рис.3.12, табл.3.9).

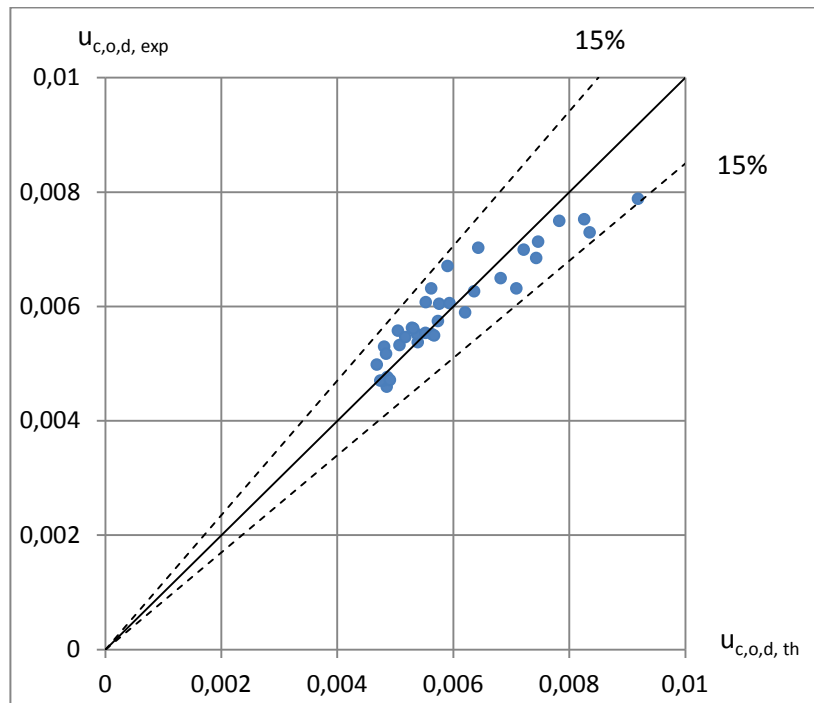


Рис.3.12. Відхилення експериментальних значень критичних деформацій від теоретичних за формулою автора (2.9) суцільної деревини листяних та хвойних порід вологістю 21%

Отже, аналізуючи отримані дані, що представлені на рис.3.12 та табл.3.9. приходимо до висновку, що збіжність теоретичних та експериментальних значень відносних критичних деформацій деревини за вологості 21% є задовільною незалежно від породи деревини. Максимальна розбіжність складає $\Delta_{u, \max} = 14,30\%$.

Таблиця 3.9

Статистична оцінка формули автора (2.9) з визначення критичних деформацій суцільної деревини листяних та хвойних порід вологістю 21%

Формула для визначення критичних деформацій	Відхилення від експериментальних значень, %				
	$\Delta_{u,1}$	$\Delta_{u,2}$	Δ_u	σ_u	$\Delta_{u,max}$
$u_{c,0,d} = f_{c,0,d} / E_c + c_1 \cdot f_{c,0,d}^2$, де $c_1 = 2,69 \cdot 10^{-6} \text{ (МПа)}^{-2}$	-13,42	14,30	-0,19	7,12	14,30
36 зразків. $\Delta_{u,1}$, $\Delta_{u,2}$ – нижня та верхня межі відхилень від експериментальних значень; Δ_u , σ_u – середньоарифметичні та стандартні значення цих відхилень; $\Delta_{u,max}$ – максимальне з $\Delta_{u,1}$ і $\Delta_{u,2}$.					

3.2.2.4. Граничні відносні деформації суцільної деревини за повздовжнього стиску вологістю 21%

Аналогічним чином, як і для деревини з вологістю 30%, визначаємо граничні відносні деформації листяних та хвойних порід деревини. Спочатку обчислюємо коефіцієнти поліному запропонованої функції (2.5) w_1, w_2, w_3, w_4 , а також послідовно записуємо необхідні міцнісні та деформівні характеристики, які були знайдені в попередніх пунктах даної роботи, зокрема критичні відносні деформації розтягу деревини $u_{t,0,d}$ згідно рис.1.2 [291] та стиску $u_{c,0,d}$ вздовж волокон, а також початкового модуля пружності (табл.3.8).

Після знаходження коефіцієнтів поліному (2.5) будемо діаграми «момент-кривина» всіх досліджуваних порід деревини вологістю 21% (рис.3.13а, рис.3.13б) на основі алгоритму (рис.2.20).

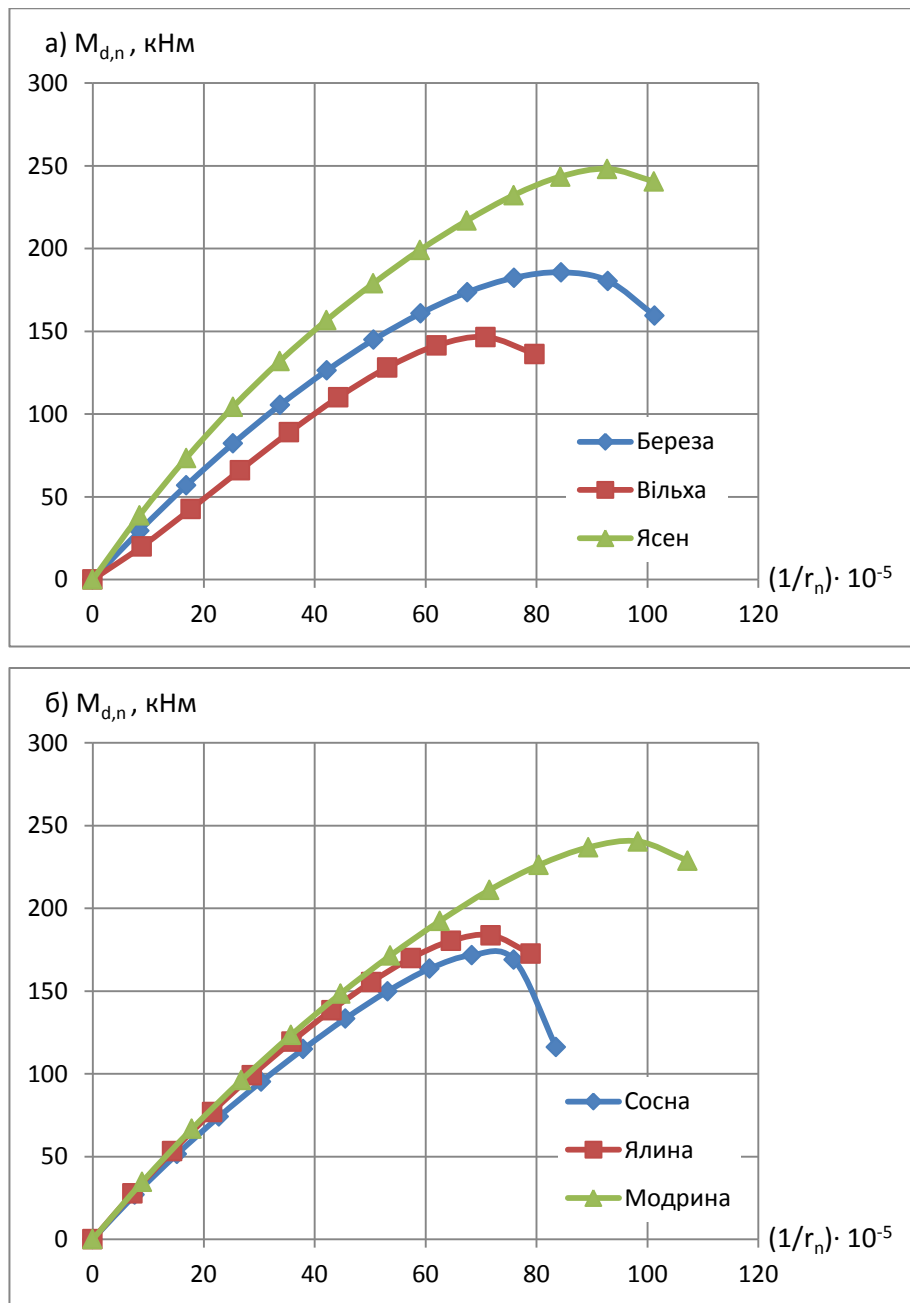


Рис.3.13. Діаграми «момент–кривина» за вологості 21% відповідно:

а) листяних порід; б) хвойних порід

Отримані діаграми «момент–кривина» (рис.3.13а, рис.3.13б) трансформуємо в діаграми «момент–деформації» (рис.3.14а, рис.3.14б) та встановлюємо значення граничних відносних деформацій деревини за вологості 21% (табл.3.10).

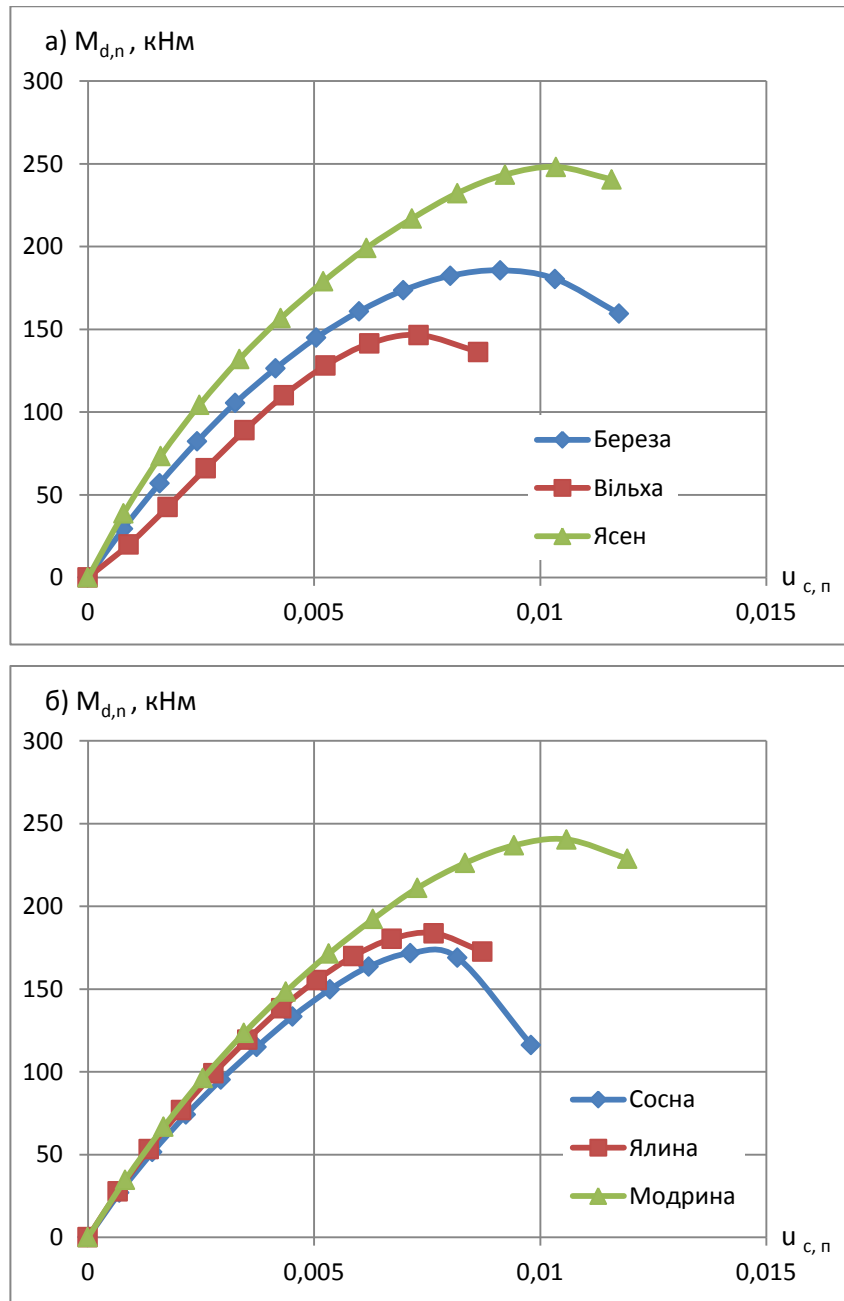


Рис.3.14. Трансформація діаграм «момент-кривина» в діаграми «момент-деформації» за вологості 21% відповідно: а) листяних порід; б) хвойних порід

Граничні деформації за вологості 21% (третя ділянка, спадна вітка діаграми) мають наступні показники: для деревини берези в порівнянні зі значеннями за вологості 30% практично не змінилися $u_{c,u}=0,00894$; для вільхи зменшилися на 9,7% та досягли позначки $u_{c,u}=0,00752$; для ясеня зменшилися на 7,3% - $u_{c,u}=0,01021$; для модрина незначно зменшилися на 1,8% - $u_{c,u}=0,01038$;

для сосни зменшилися на 9,2% - $u_{c,u}=0,00714$; для ялини практично не змінилися - $u_{c,u}=0,00775$.

Таблиця 3.10

До визначення усереднених граничних деформацій суцільної деревини за вологості 21%

Породи деревини	Коефіцієнти поліному (2.5)				$u_{c,0,d}$	$u_{t,0,d}$	E_0 , МПа	$u_{c,u}$
	w_1	w_2	w_3	w_4				
Береза	10399	-7232	2734	-928	0,00593	0,00927	10900	0,00894
Вільха	4209	8649	-9435	1796	0,00504	0,01090	8800	0,00752
Ясен	13805	-16364	12145	4004	0,00671	0,00847	14700	0,01021
Модрина	11800	-11225	8030	-3179	0,00717	0,00892	12000	0,01038
Сосна	10835	-11063	10599	-5016	0,00549	0,00818	11000	0,00714
Ялина	11513	-10011	7841	-3590	0,00532	0,00760	12100	0,00775

Також встановлено співвідношення відносних граничних до критичних деформацій (експериментальні значення):

- берези $u_{c,u}=1,51u_{c,0,d}$;
- вільхи $u_{c,u}=1,49u_{c,0,d}$;
- ясеня - $u_{c,u}=1,52u_{c,0,d}$;
- модрина - $u_{c,u}=1,45u_{c,0,d}$;
- сосни - $u_{c,u}=1,30u_{c,0,d}$;
- ялини - $u_{c,u}=1,46u_{c,0,d}$.

3.2.2.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження-деформації» за стиску вздовж волокон

Для встановлення достовірності запропонованої функції (2.5), як для опису повних діаграм деформування, так і з обмеженням в точці граничних деформацій, за вологості 21%, проведемо апроксимацію діаграм механічного

стану всіх порід деревини, що досліджуються. Визначимо всі коефіцієнти поліному w_1, w_2, w_3, w_4 і запишемо їх для діаграми з обмеженням в точці граничних деформацій в табл. 3.11, а для повної – в табл. 3.12.

Таблиця 3.11

Результати апроксимації діаграм листяних та хвойних порід деревини за вологості 21% з обмеженням в точці граничних деформацій

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (2.5) та дослідних значень η
	w_1	w_2	w_3	w_4	
Береза	10364,61	-6889,76	1846,91	-348,14	0,999
Вільха	3981,63	10194,23	-12496,96	3539,36	0,999
Ясен	13769,59	-16272,07	11895,50	-3837,93	0,999
Модрина	11729,71	-10534,50	6266,23	-2036,05	0,998
Сосна	10758,63	-10362,63	8921,35	-3962,16	0,999
Ялина	11507,42	-9964,32	7726,34	-3517,57	0,999

Діаграми деформування деревини з обмеженням в точці граничних деформацій побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) за вологості 21% для ясена наведені на рис.3.16а, а для ялини на рис.3.16б; повних – ясена (рис.3.17а), ялини (рис.3.17б).

Для інших порід деревини носили подібний характер.

Збіжність експериментальних результатів з теоретичними для діаграм з обмеженням в точці граничних відносних деформацій є дуже високою та в більшості прямує до 1 (табл.3.11).

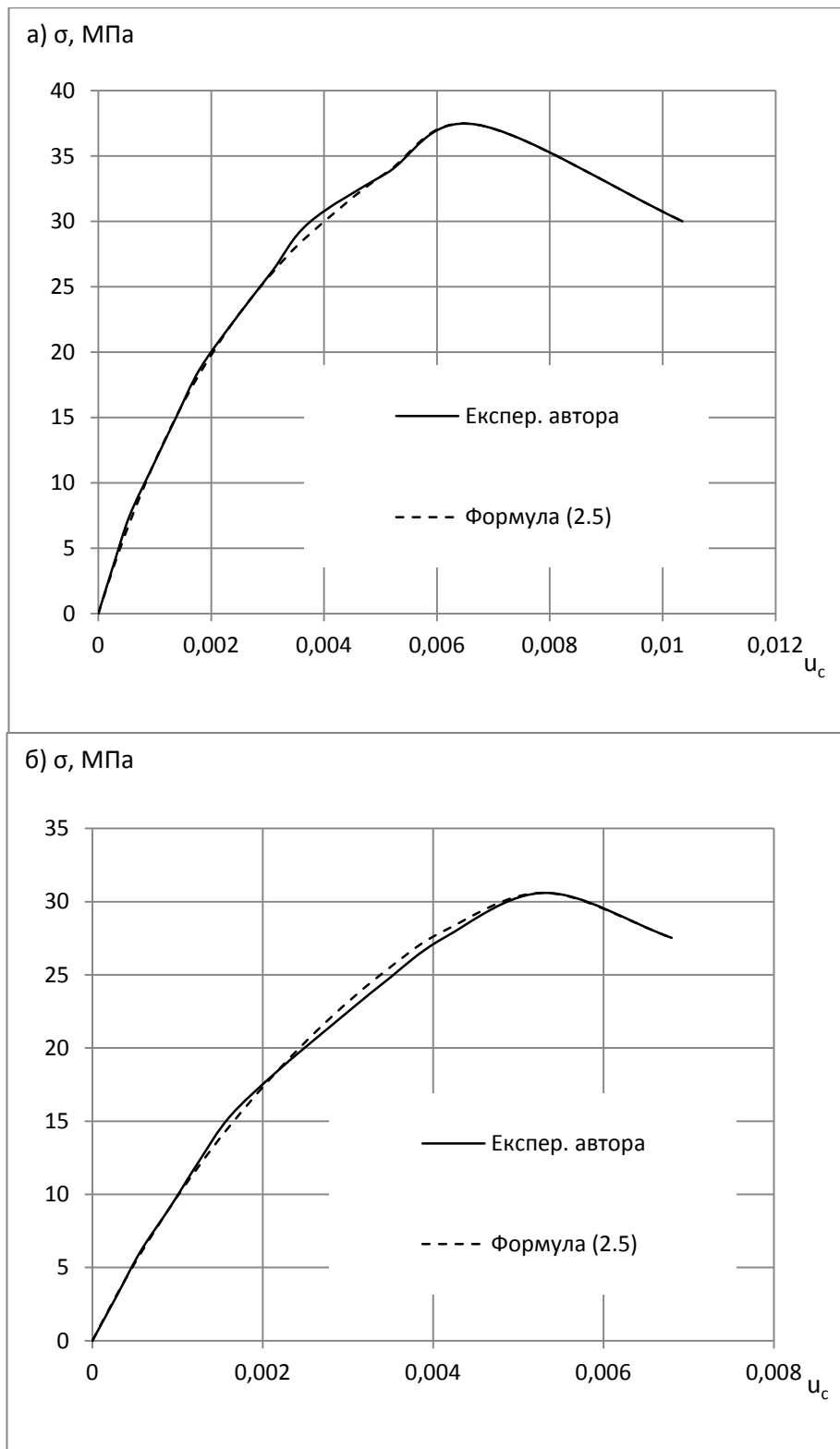


Рис.3.16. Діаграми деревини з обмеженням в точці граничних деформацій, побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5), вологістю 21%: а) ясена; б) ялини

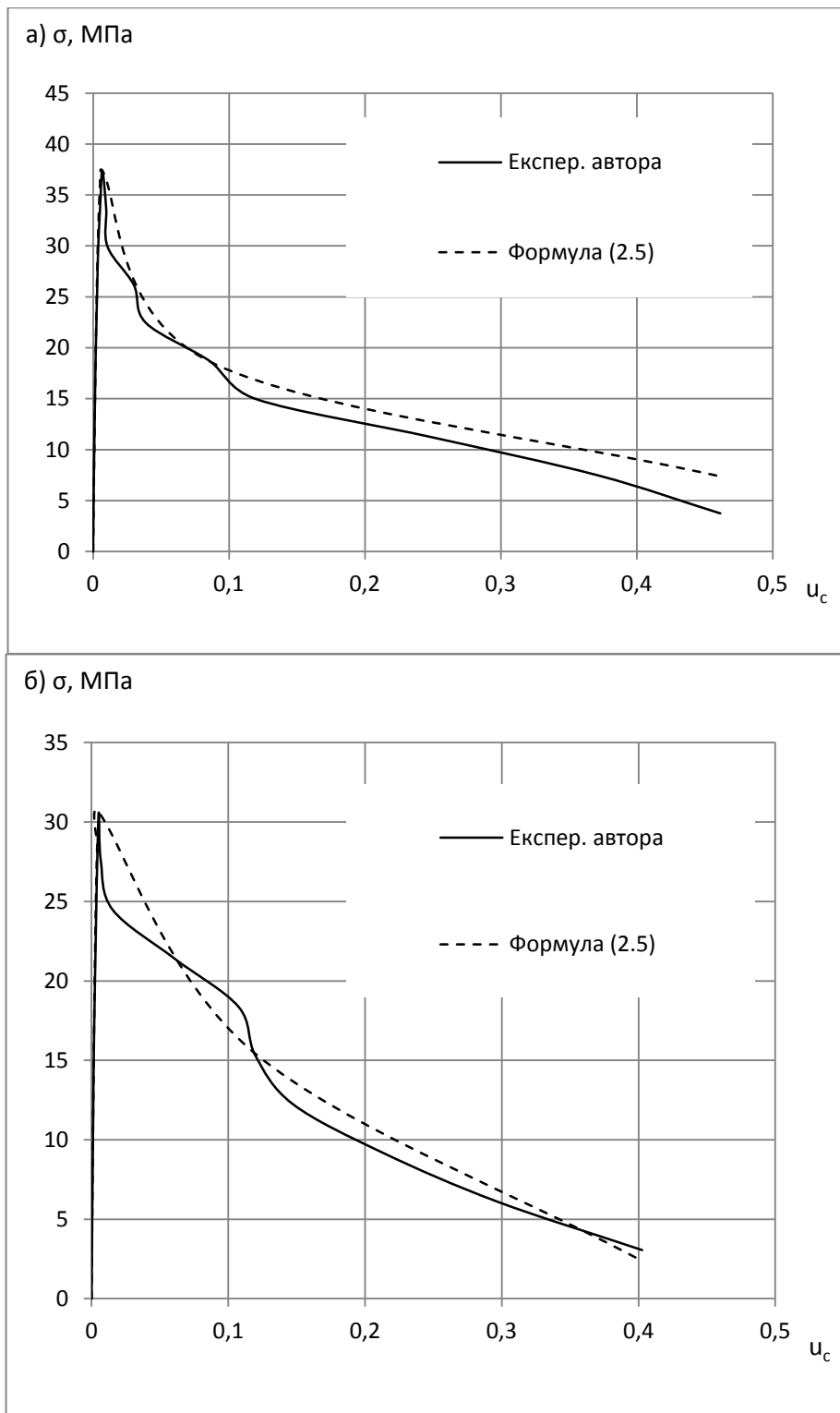


Рис.3.17. Повні діаграми деревини, побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5), вологістю 21%: а) ясена; б) ялини

Збіжність експериментальних результатів з теоретичними для повних діаграм деформування деревини з вологістю 21% є в межах $\eta=0,978\dots0,993$ (табл.3.12).

Результати апроксимації повних діаграм листяних та хвойних порід деревини за вологості 21%

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (2.9) та дослідних значень η
	w_1	w_2	w_3	w_4	
Береза	9884,81	-5135,16	227,27	2,22	0,982
Вільха	7468,89	-2372,23	122,99	-1,39	0,981
Ясен	12309,95	-7307,81	586,97	-7,02	0,978
Модрина	11221,00	-6169,87	378,77	-4,51	0,993
Сосна	9687,61	-4619,05	289,91	-3,28	0,985
Ялина	11221,24	-5768,45	302,11	-3,01	0,986

Отже, функція (2.5) в повній мірі підходить для апроксимації, як дійсних (повних) діаграм деформування деревини зразків конструкційних розмірів вологістю 21%, так і оптимізованих (з обмеженням в точці граничних деформацій).

3.2.3. Дослідження суцільної деревини хвойних та листяних порід вологістю 12 % віком 60 років

Аналіз будемо проводити зі зразками вологістю 21% віком 60 років.

3.2.3.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c - деформації u_c »

За результатами експериментальних досліджень призм із суцільної деревини на стиск вздовж волокон побудовано повні діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » від початку завантаження до повного руйнування листяних

(рис.3.18а) та хвойних (рис.3.18б) порід віком 60 років стандартною вологістю 12% за жорсткого режиму прикладення навантаження (за приростом переміщень плити випробувальної машини).

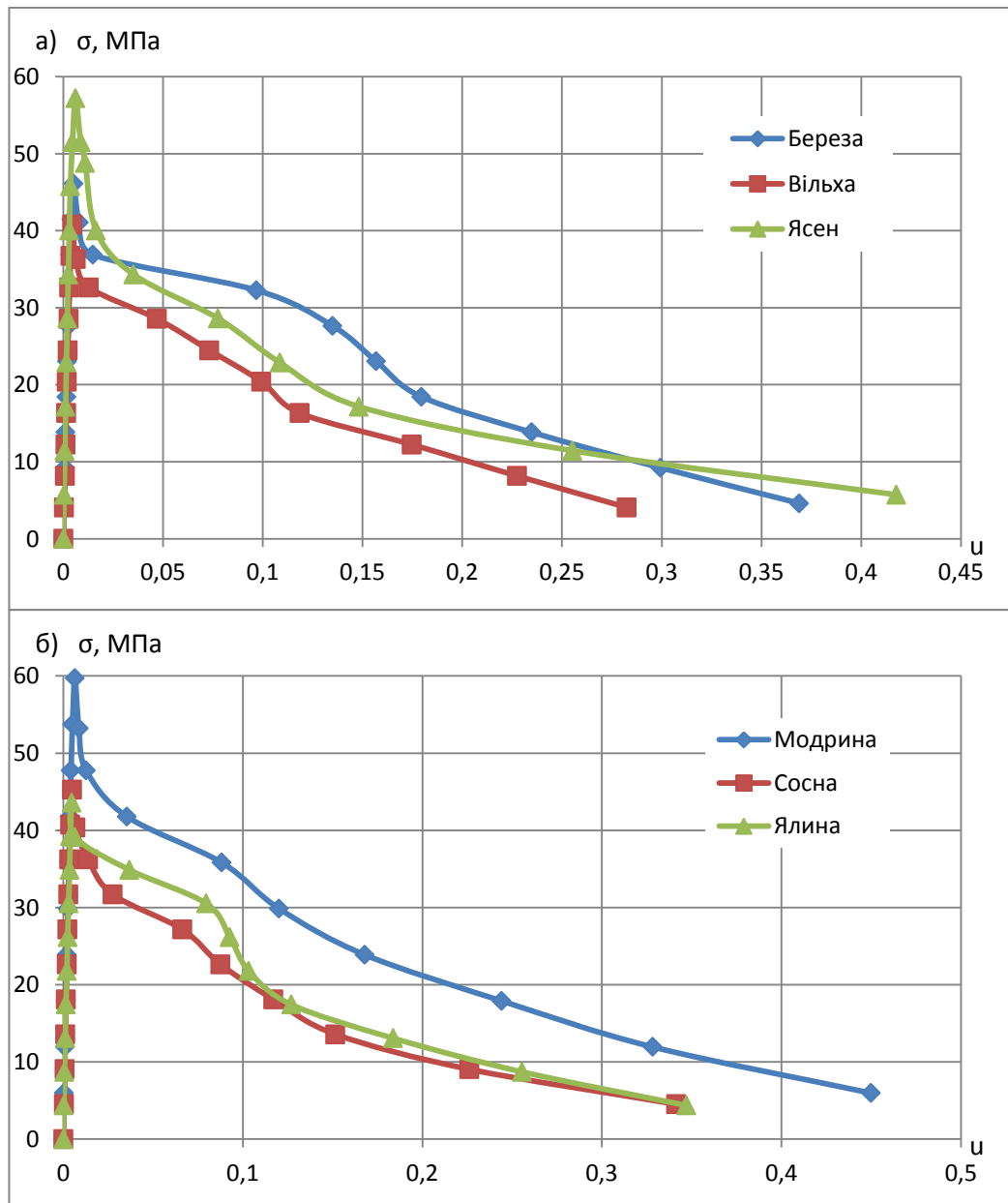


Рис.3.18. Дійсні (повні) діаграми деформування суцільної деревини віком 60 років за стандартної вологості 12%: а) листяних порід; б) хвойних порід

За отриманими даними проведемо детальний аналіз зміни показників міцності та деформівності на чотирьох, раніше встановлених, ділянках діаграми деформування деревини в порівнянні з призмами вологістю 21%.

Перша ділянка діаграми, на яку впливають деформації змінання торцевого обтиснення зразка, закінчується для листяних порід за таких значень напружень (рис.3.18а): для деревини берези $\sigma_{cl}= 8,9$ МПа і воно зростає в 1,31 раза, а відносні деформації в той же час дещо зменшуються ($u_{cl}=0,00068$); для деревини вільхи збільшуються в 1,52 раза і сягають $\sigma_{cl}= 6,7$ МПа, а деформації зменшуються фактично в тому ж діапазоні 1,11 раза ($u_{cl}=0,00071$); для деревини ясена напруження збільшуються в 1,06 раза ($\sigma_{cl}= 8,5$ МПа) при цьому деформівність зразків практично не змінюється $u_{cl}=0,00057$.

На першій ділянці для хвойних порід (рис.3.18б) спостерігається та ж тенденція, що і для листяних: зокрема для зразків деревини модрина напруження зростають в 1,15 раза та досягають позначки $\sigma_{cl}= 9,0$ МПа, а повздовжні відносні деформації незначно зменшуються ($u_{cl}=0,00070$); для сосни також напруження на даній ділянці дещо збільшуються в 1,13 рази ($\sigma_{cl}= 7,8$ МПа), деформівність зменшується в 1,06 рази ($u_{cl}=0,00063$); для деревини ялини напруження зростають в 1,24 раза до значень $\sigma_{cl}= 6,7$ МПа, а деформації зразка зменшуються в 1,15 рази ($u_{cl}=0,00060$).

Аналізуючи, в цілому, першу ділянку діаграм деформування всіх порід за стандартної вологості 12% віком 60 років приходимо до висновку, що міцність деревини збільшується в межах 1,06...1,52 раза, а деформівність до 15%.

Друга ділянка дійсної діаграми деформування деревини « $\sigma_c - u_c$ », яка знаходиться на висхідній вітці, носить такий же характер, що і для першої, але має дещо інші показники збільшення міцності та зменшення деформівності.

Отже, експериментальні значення листяних порід (закінчення другої ділянки, вершина діаграми «напруження-деформації») максимальних напружень (межа міцності) та критичних деформацій мають наступні значення (рис.3.18а): для деревини берези напруження значно зростає в 1,56 раза та досягає відмітки $f_{c,0,d}=46,1$ МПа, деформівність зразків зменшується в 1,13 раза ($u_{c,0,d,exp}=0,00525$); максимальні напруження призми вільхи збільшуються в 1,55 раза ($f_{c,0,d}=40,6$ МПа), а критичні деформації зменшуються в 1,12 раза до

позначки $u_{c,0,d,exp}=0,00450$; міцність деревини ясена зростає до $f_{c,0,d}=57,7$ МПа, при цьому деформівні показники зменшуються в 1,10 раза ($u_{c,0,d,exp}=0,00610$).

На другій ділянці повної діаграми «напруження-деформації» міцнісні та деформівні показники хвойних порід становлять (рис.3.18б): максимальні напруження деревини модрина зросли в 1,48 рази та досягли відмітки $f_{c,0,d}=59,7$ МПа, а в той же час критичні деформації падають в 1,12 раза ($u_{c,0,d,exp}=0,00641$); межа міцності сосни за вологості 12% складає $f_{c,0,d}=45,3$ МПа, що в 1,51 раза більше, ніж за вологості 21%, а деформівні показники зменшуються в 1,07 раза $u_{c,0,d,exp}=0,00549$; для деревини ялини напруження зростають в 1,42 раза, а деформівність впала в 1,14 раза до позначки $u_{c,0,d,exp}=0,00467$.

На другій ділянці міцнісні параметри листяних та хвойних порід збільшуються в межах 42–56% в порівнянні з призмами вологістю 21%. Деформівність несуттєво зменшується в межах 7–14 %.

Аналіз третьої ділянки повної діаграми деформування деревини за стандартної вологості в 12% детально розглянемо в п.3.2.2.4.

Остання четверта ділянка характеризується різким збільшенням відносних деформацій, аналогічно, як і за вологості 21 та 30%, на спадній вітці діаграми «напруження–деформації» (рис.3.18а, рис.3.18б). Найбільші накопичення повних відносних деформацій вдалося зафіксувати приблизно за тих же залишкових напружень в деревині, що були і за інших показників вологості. Після цього проводилося розвантаження всіх зразків. Отже, нам вдалося зафіксувати наступні остаточні показники сумарних відносних деформацій деревини листяних та хвойних порід: берези – $u_{c,fin}=0,3690$ (в 1,13 раза менше); вільхи $u_{c,fin}=0,2761$ (в 1,15 раза менше); ясена $u_{c,fin}=0,4253$ (в 1,08 раза менше); модрина $u_{c,fin}=0,4498$ (в 1,14 раза менше); сосни $u_{c,fin}=0,3415$ (в 1,17 раза менше); ялини $u_{c,fin}=0,3471$ (в 1,20 раза менше).

В цілому, на даній ділянці спостерігається зменшення деформівності суцільної деревини за стандартної вологості 12% віком 60 років в межах 8 - 20%.

Приходимо до висновку, що висушування деревини до стандартної вологості 12% сприяє зміні основних фізико-механічних показників деревини листяних та хвойних порід та суттєво впливає на діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » на всіх її ділянках, зокрема значно збільшує міцнісні показники та зменшує деформівні.

3.2.3.2. Визначення початкового модуля пружності деревини та модуля деформацій (січного)

Діаграми «E– η » (січний модуль – рівень напружень) вже були наведені в п. (рис.2.17а, рис.2.17б), тому в даному параграфі проведемо їх аналіз в порівнянні з вологістю 21%.

Отже, були отримані наступні показники початкового модуля пружності за стандартної вологості 12% віком 60 років:

– для листяних порід (рис.2.17а): берези $E_0=12300$ МПа (в 1,13 раза більше), вільхи $E_0=12000$ МПа (в 1,38 раза більше), ясена $E_0=16000$ МПа (в 1,09 раза більше);

– для хвойних порід (рис.2.17б): модрина $E_0=13700$ МПа (в 1,14 раза більше), сосни $E_0=12900$ МПа (в 1,17 раза більше), ялини $E_0=14800$ МПа (в 1,19 раза більше).

Приходимо до висновку, що початковий модуль пружності досліджуваних порід деревини збільшується на 9-38% в порівнянні з показниками вологістю 21%.

Проаналізуємо зміну модуля деформацій таким же чином, як і за вологості 30 та 21%. Також спостерігалось зменшення величини січного модуля, але дещо в іншому діапазоні: для деревини берези в 1,15 раза; вільхи в 1,21 раза; ясена в 1,23 раза; модрина в 1,22 раза; сосни в 1,17 раа; ялини в 1,47 раза.

Зменшення інтервалу зміни модуля деформацій (січного) пояснюється фактичним зменшенням складової пластичних та значним збільшенням

складової пружних деформацій в загальному показнику відносних деформацій сухої деревини.

3.2.3.3. Критичні відносні деформації суцільної деревини за стандартної вологості 12% віком 60 років

За діаграмами «напруження-деформації» суцільної деревини стандартною вологістю 12% віком 60 років $u_{c,0,d,exp}$ (рис.3.18а, рис.3.18б) визначаємо критичні деформації всіх зразків окремо для кожної породи. Усереднені значення критичних деформацій показані в табл.2.9.

Аналогічним чином, як і за вологості 21 та 30%, критичні деформації суцільної деревини листяних та хвойних порід $u_{c,0,d,th}$ знаходимо теоретичним шляхом за формулою (2.9) (табл.2.9), при цьому коефіцієнт складає $c_1 = 6,55 \cdot 10^{-7} \text{ (МПа)}^{-2}$ для будь-яких листяних та хвойних порід вологістю 12%. Також в даній таблиці є дві складові – пружна $u_{c,el,th}$ та пластична $u_{c,pl,th}$.

Таким чином значення критичних деформацій за вологості 12%, визначених за формулою (2.9), в основному зменшилися в порівнянні з тими ж показниками вологості 21% (табл. 2.9): берези фактично залишилися такими ж; вільхи в 1,06 раза; ясена в 1,09 раза; модрина в 1,09 раза; сосни в 1,03 раза; ялини в 1,18 раза.

Також проведемо окремий аналіз пружної та пластичної складової критичних деформацій, оскільки формула (2.9) дозволяє нам це зробити.

Отже, пружна складова критичних деформацій понесла наступні зміни: для берези збільшилася в 1,39 раза; вільхи – в 1,17 раза; ясена – в 1,42 раза; модрина – в 1,35 раза; сосни – в 1,31 раза; ялини – в 1,20 раза.

А пластична складова, в цілому, зменшилася для всіх досліджуваних порід деревини: для берези в 1,68 раза; вільхи в 1,71 раза; ясена в 1,73 раза; модрина в 1,75 раза; сосни в 1,74 раза; ялини в 2,03 раза.

Для критичних деформацій, які визначені експериментальним та теоретичним шляхом, відбувається характерне зменшення значень за вологості 12% в порівнянні з 21%, але з різними діапазонами зміни. В той же час складові

критичних деформацій функції (2.9) змінюються по різному: пружна – збільшується, пластична – зменшується.

Також бачимо, що за стандартної вологості 12% складові формули (2.9) є різними, де пластична складова є меншою за пружну.

Статистичний аналіз отриманих автором експериментальних та теоретичних результатів досліджень був проведений в п. 2.10. (рис.2.16), (табл.2.9).

3.2.3.4. Граничні деформації за стандартної вологості 12% віком 60 років

Аналогічним чином, як і для деревини з вологостю 21 та 30%, визначаємо граничні деформації листяних та хвойних порід деревини. Спочатку знаходимо коефіцієнти поліному w_1, w_2, w_3, w_4 запропонованої для розрахунку функції (2.5). А також послідовно записуємо необхідні міцнісні та деформівні характеристики деревини, які були знайдені в попередніх пунктах розділу, зокрема критичні відносні деформації розтягу $u_{t,0,d}$ за даними [82] та стиску $u_{c,0,d}$ вздовж волокон, а також початкового модуля пружності.

Після знаходження всіх коефіцієнтів поліному (2.5) будуюмо діаграми «момент-кривина» всіх досліджуваних порід деревини за стандартної вологості 12% віком 60 років (рис.3.19а, рис.3.19б) на основі алгоритму (рис.2.20).

На основі побудованих діаграм (рис.3.19а, рис.3.19б) трансформуємо діаграми «момент–кривина» в діаграми «момент–деформації» (рис.3.20а, рис.3.20б) та встановлюємо значення граничних деформацій за вологості 12% віком 60 років (табл.3.14).

Отже, граничні деформації за вологості 12% (III ділянка, спадна вітка діаграми) мають наступні показники: для деревини берези в порівнянні зі значеннями за вологості 21% зменшилися на 14,9% $u_{c,u}=0,00778$; вільхи – на 18,6% та досягли позначки $u_{c,u}=0,00634$; ясена – на 1,3% ($u_{c,u}=0,01008$); модрина

зменшилися на 18,8% ($u_{c,u}=0,0874$); сосни – на 5,2% ($u_{c,u}=0,00679$); ялини – на 19,1% ($u_{c,u}=0,00649$).

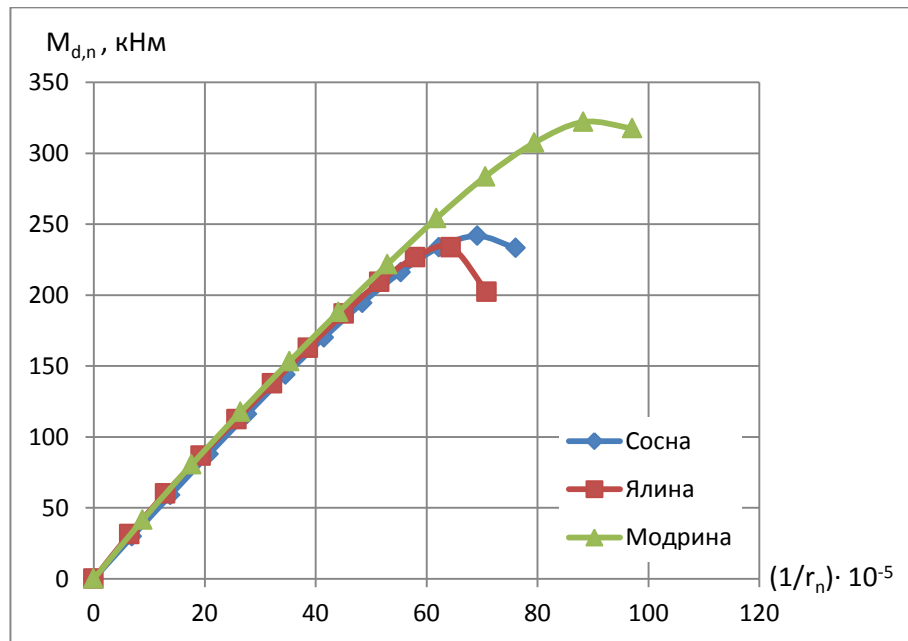
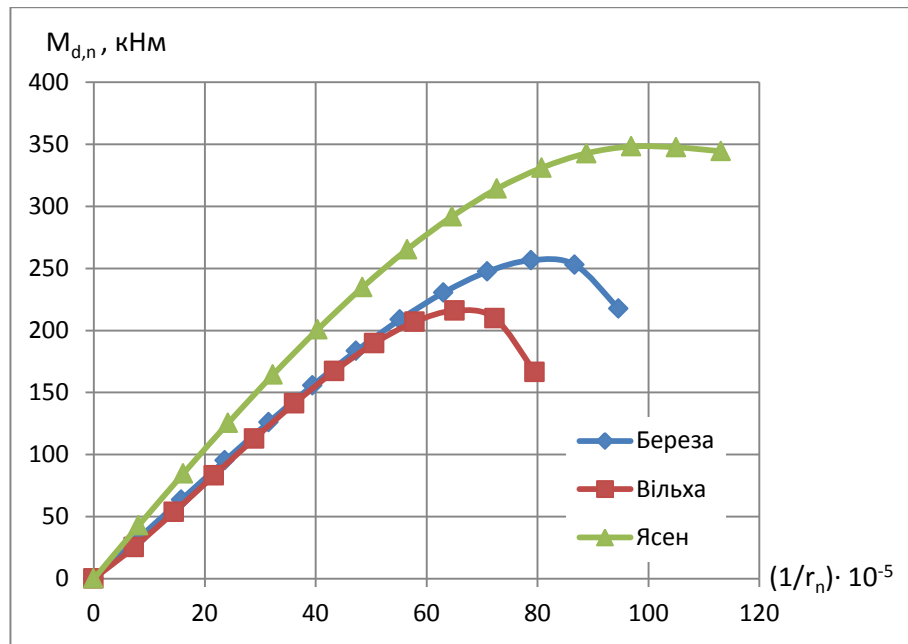


Рис.3.19. Діаграми «момент-кривина» за стандартної вологості 12% (вік 60 років) відповідно: а) листяних порід; б) хвойних порід

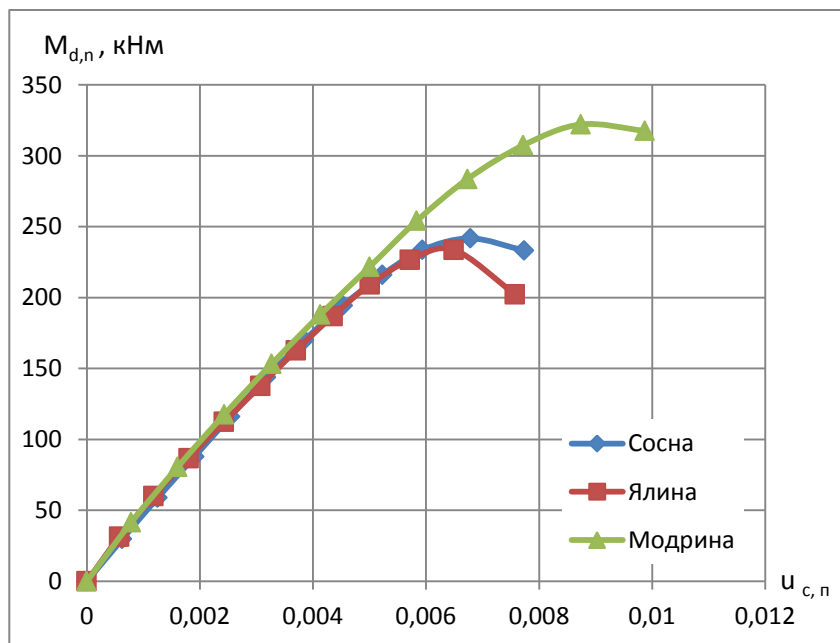
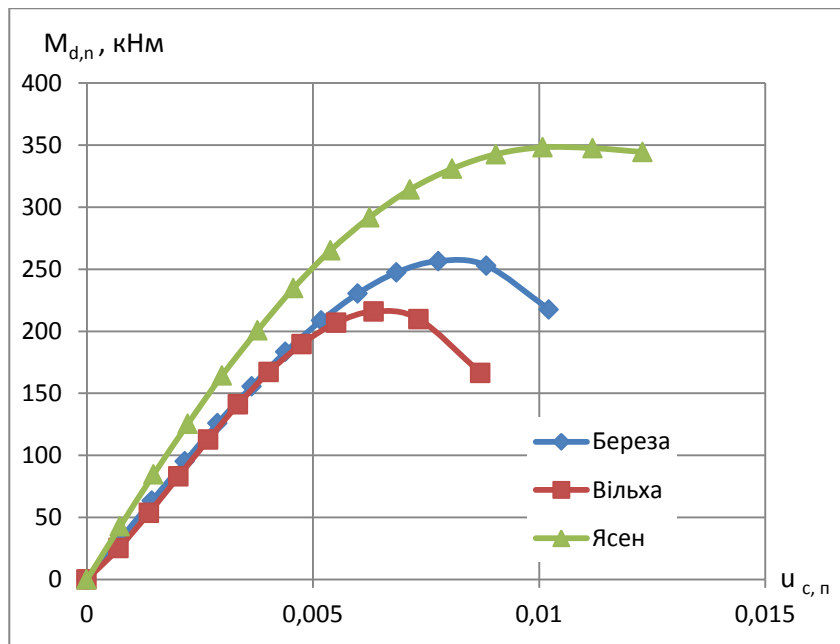


Рис.3.20. Діаграми «момент–деформації» за стандартної вологості 12% (вік 60 років) відповідно: а) листяних порід; б) хвойних порід

Для всіх порід деревини спостерігається зменшення граничних деформацій в порівнянні зі зразками вологістю 21%.

Визначені усереднені граничні деформації суцільної деревини порід, що досліджуються, за вологості 12% віком 60 років заносимо в табл. 3.14.

До визначення усереднених граничних деформацій суцільної деревини за вологості 12% віком 60 років

Породи деревини	Коефіцієнти поліному (2.5)				$u_{c,0,d}$	$u_{t,0,d}$	E_0 , МПа	$u_{c,u}$
	w_1	w_2	w_3	w_4				
Береза	11295	1742	-4265	11	0,00525	0,00894	12300	0,00778
Вільха	7313	15027	-16394	3120	0,00450	0,00851	12100	0,00634
Ясен	15378	-1467	-6673	2139	0,00610	0,00844	16000	0,01008
Модрина	15102	-13234	15654	-8209	0,0640	0,00839	13700	0,00874
Сосна	12689	-2934	3381	-3916	0,00491	0,00754	12900	0,00679
Ялина	16116	-20856	27676	-13600	0,00467	0,00692	14400	0,00649

Також встановлено співвідношення відносних граничних деформацій до критичних (експериментальні значення):

– деревини берези

$$u_{c,u}=1,48u_{c,0,d}; \quad (3.1)$$

– деревини вільхи

$$u_{c,u}=1,41u_{c,0,d}; \quad (3.2)$$

– деревини ясена

$$u_{c,u}=1,65u_{c,0,d}; \quad (3.3)$$

– деревини модрини

$$u_{c,u}=1,37u_{c,0,d}; \quad (3.4)$$

– деревини сосни

$$u_{c,u}=1,38u_{c,0,d}; \quad (3.5)$$

– деревини ялини

$$u_{c,u}=1,40u_{c,0,d}. \quad (3.6)$$

3.2.3.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження – деформації»

Аналогічним чином, для встановлення достовірності запропонованої функції (2.5) проведемо апроксимацію діаграм механічного стану всіх порід деревини, як для дійсних (повних) діаграм деформування, так і оптимізованих (з обмеженням в точці граничних деформацій) за стандартної вологості 12%. Для цього визначимо всі коефіцієнти поліному w_1, w_2, w_3, w_4 : для діаграми з обмеженням в точці граничних деформацій наведені в табл. 3.15, а для повної - наведені в табл. 3.16.

Діаграми деревини з обмеженням в точці граничних деформацій побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) за вологості 12% для деревини берези наведені на рис.3.21а, а для деревини модрина на рис.3.21б; повних – рис.3.22а, рис.3.22б.

Таблиця 3.15

Результати апроксимації діаграм листяних та хвойних порід деревини за вологості 12% (вік 60 років) з обмеженням в точці граничних деформацій

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (2.5) та дослідних значень
	w_1	w_2	w_3	w_4	
Береза	11163,33	2722,25	-6324,36	1221,41	0,999
Вільха	6900,06	17834,59	-21955,43	6287,45	0,999
Ясен	15353,45	-1250,05	-7187,57	2461,22	0,999
Модрина	14893,02	-11632,53	12291,41	-6238,32	0,999
Сосна	12260,45	135,20	-2585,58	-589,96	0,999
Ялина	15599,99	-16695,05	19174,96	-8703,70	0,999

Для інших порід деревини носили подібний характер.

Збіжність експериментальних та теоретичних результатів діаграм деформування деревини з обмеженням в точці граничних деформацій є дуже високою та в більшій мірі прямує до 1 (табл.3.15).

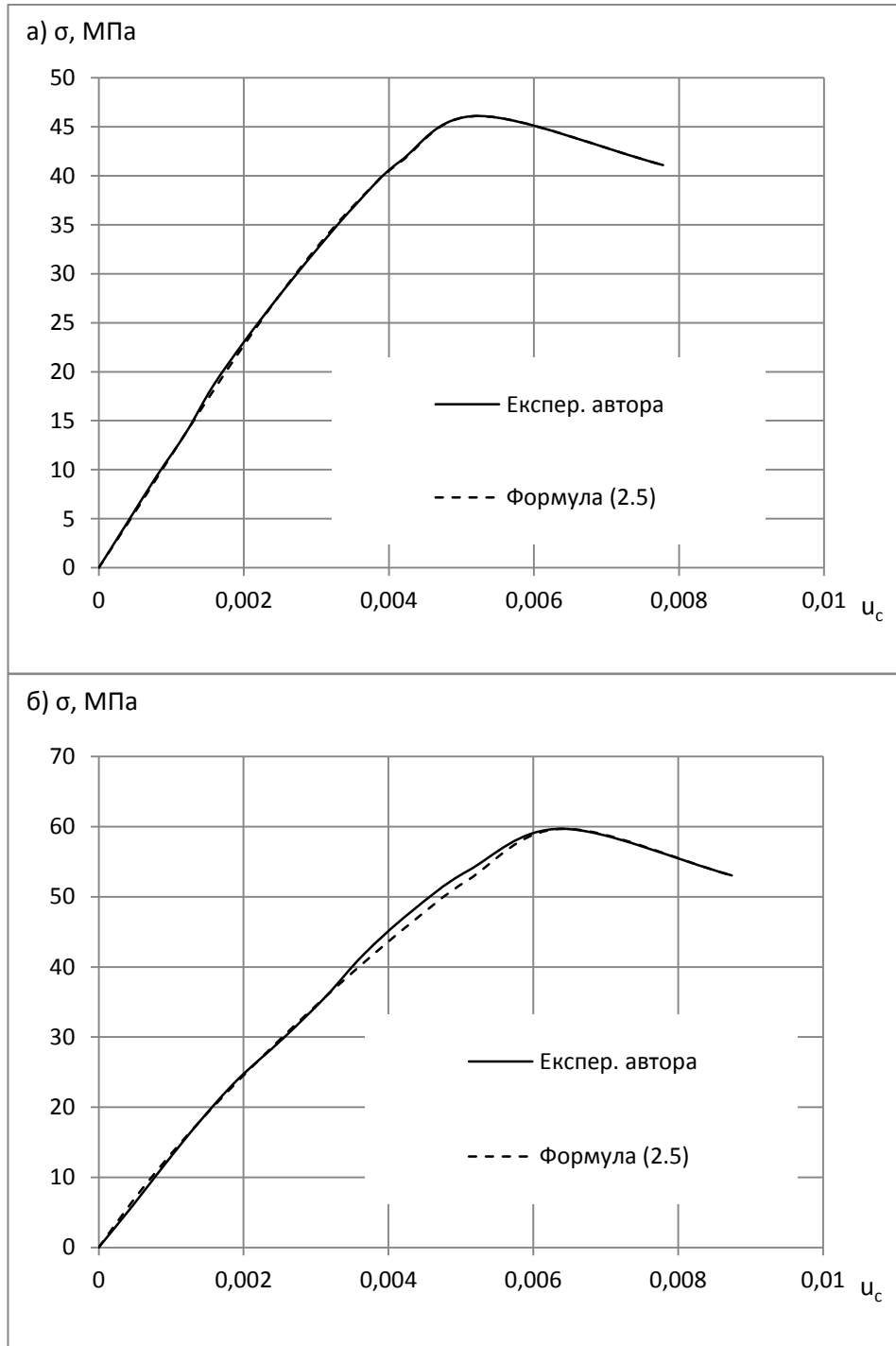


Рис.3.21. Діаграми деревини з обмеженням в точці граничних деформацій побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) вологістю 12% (вік 60 років): а) берези; б) модрини

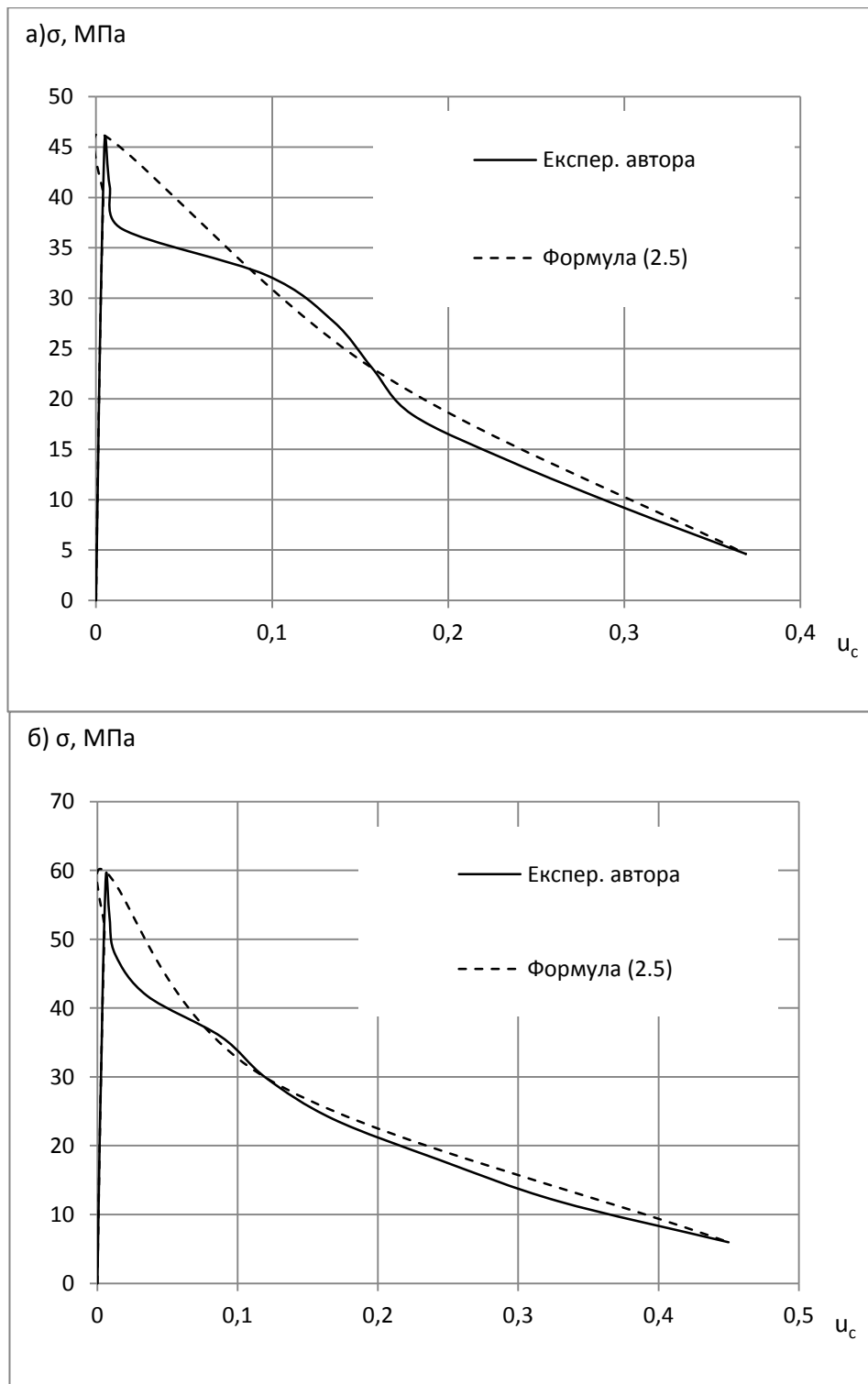


Рис.3.22. Дійсні (повні) діаграми деревини побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) вологістю 12% (вік 60 років):
а) берези; б) модрина

Результати апроксимації дійсних (повних) діаграм листяних та хвойних порід деревини за стандартної вологості 12% (вік 60 років)

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (2.5) та дослідних значень η
	w_1	w_2	w_3	w_4	
Береза	13272,52	-4687,96	200,01	-1,93	0,992
Вільха	12378,01	-2137,46	-1193,40	19,51	0,986
Ясен	16816,62	-8059,25	627,18	-7,49	0,974
Модрина	13380,71	-4305,50	240,96	-2,60	0,980
Сосна	13457,32	-4496,35	262,02	-2,88	0,983
Ялина	12216,86	-3022,61	143,35	-1,41	0,990

Збіжність експериментальних та теоретичних результатів дійсних (повних) діаграм деформування сухої деревини за вологості 12% є також досить високою та знаходиться в межах $\eta=0,974\dots 0,992$.

Отже, функція (2.5) в повній мірі підходить для апроксимації, як повних діаграм деформування зразків конструкційних розмірів стандартною вологістю 12%, так і з обмеженням в точці граничних деформацій.

3.3. Взаємозв'язок вологості з основними міцнісними та деформівними параметрами діаграми «напруження σ_c – деформації u_c »

Деревина в процесі експлуатації може мати різні показники вологості відмінні від тих, що ми досліджували. Проводячи експериментальні дослідження хвойних та листяних порід деревини конструкційних розмірів, а потім обробляючи результати, було помічено, що за різних показників вологості міцнісні та деформівні параметри є мінливими.

Тому важливо визначати такі показники і за інших рівнів. Це можливо виконати, будуючи графіки залежностей вологості в межах 12-50% від таких характеристик. Ці діаграми дозволять нам визначати основні міцнісні та деформівні параметри за будь-якої вологості, а внаслідок цього мати дійсні значення таких показників. Це дасть змогу в подальшому ще більш широко враховувати мінливі властивості деревини, а також правильно експлуатувати матеріали, деталі, вироби, елементи, конструкції в умовах агресивного середовища. З іншого боку дозволить проектувальникам з більшою ймовірністю правильно проводити розрахунки елементів та конструкцій з деревини з врахуванням різних показників вологості в межах 12...50%, що в свою чергу підвищить довговічність таких елементів чи конструкцій.

Таким чином, на основі проведеного експерименту всіх досліджуваних зразків конструктивних розмірів за осьового повздовжнього стиску будуюмо залежність між усередненими максимальними напруженнями та відповідними показниками вологості листяних (рис.3.23а) та хвойних порід (рис.3.23б). Аналізуючи дані графіки, приходимо до висновку, що максимальна міцність деревини є змінною в межах 12-30%, в подальшому напруження залишаються сталими.

На основі рис.3.23а та рис.3.23б було встановлено максимальні напруження (межу тимчасової міцності деревини) всіх досліджуваних порід деревини в межах 12-30% через 1% (додаток Г1).

Також велике значення для нас має зміна значень початкового модуля пружності від різних показників вологості, яка наведена на рис.3.24а – для листяних порід та рис.3.24б – для хвойних. Аналогічним чином наводиться зміна даного параметру через 1% в додатку Г2.

Також побудовано графік залежності усереднених критичних деформацій деревини за середніми значеннями на основі проведених експериментальних досліджень та визначених за функцією (2.9) від вологості (рис.3.25а, рис.3.25б).

Для встановлення більшої точності наших досліджень критичні деформації в даному випадку приймалися середніми між експериментальними та теоретичними значеннями.

Критичні деформації деревини хвойних та листяних порід визначено через 1% в межах 12-30% (додаток Г3). Аналогічним чином для пружної та пластичної складової в додатках Г4 та Г5.

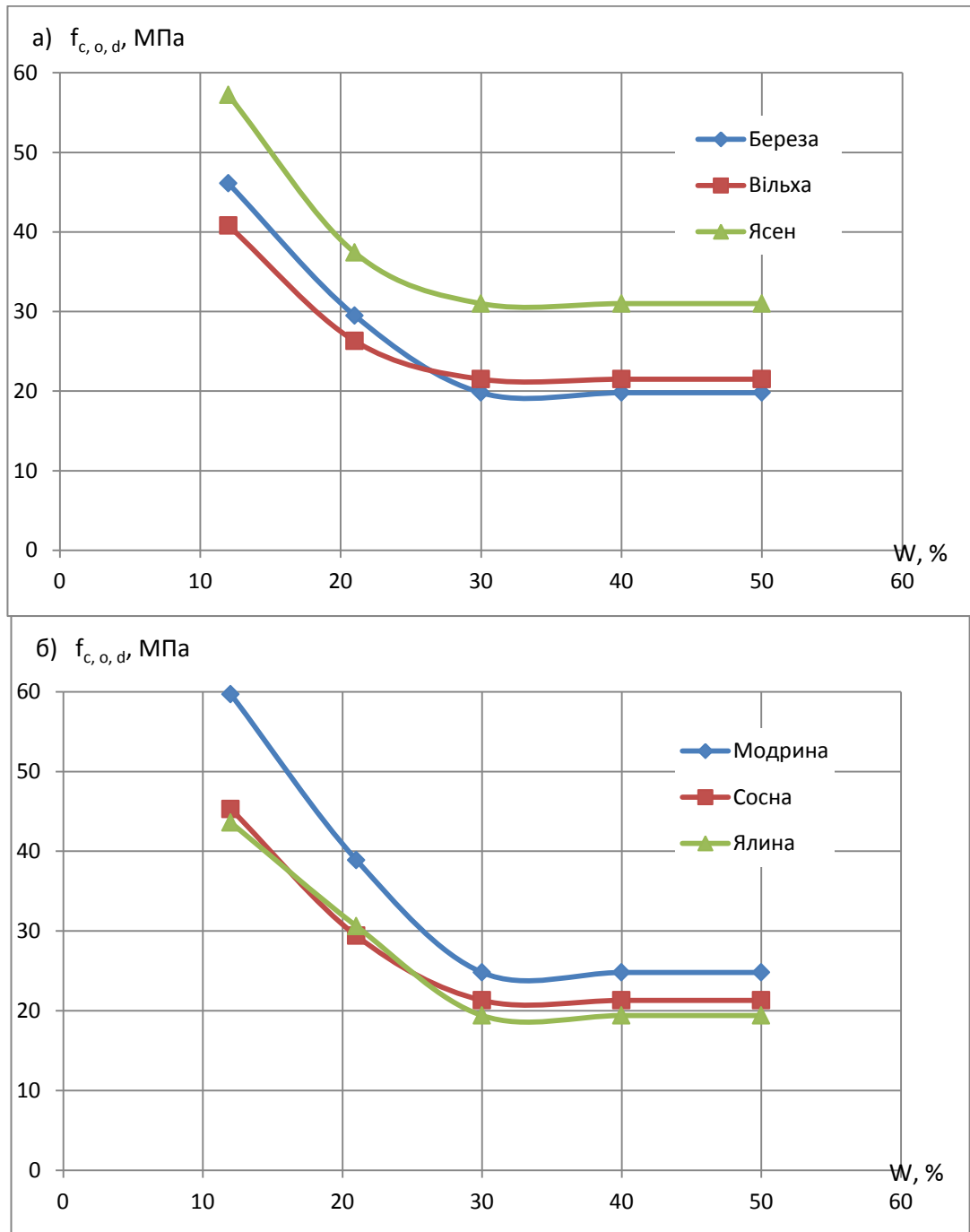


Рис.3.23. Залежність максимального напруження суцільної деревини від вологості: а) листяних порід; б) хвойних порід

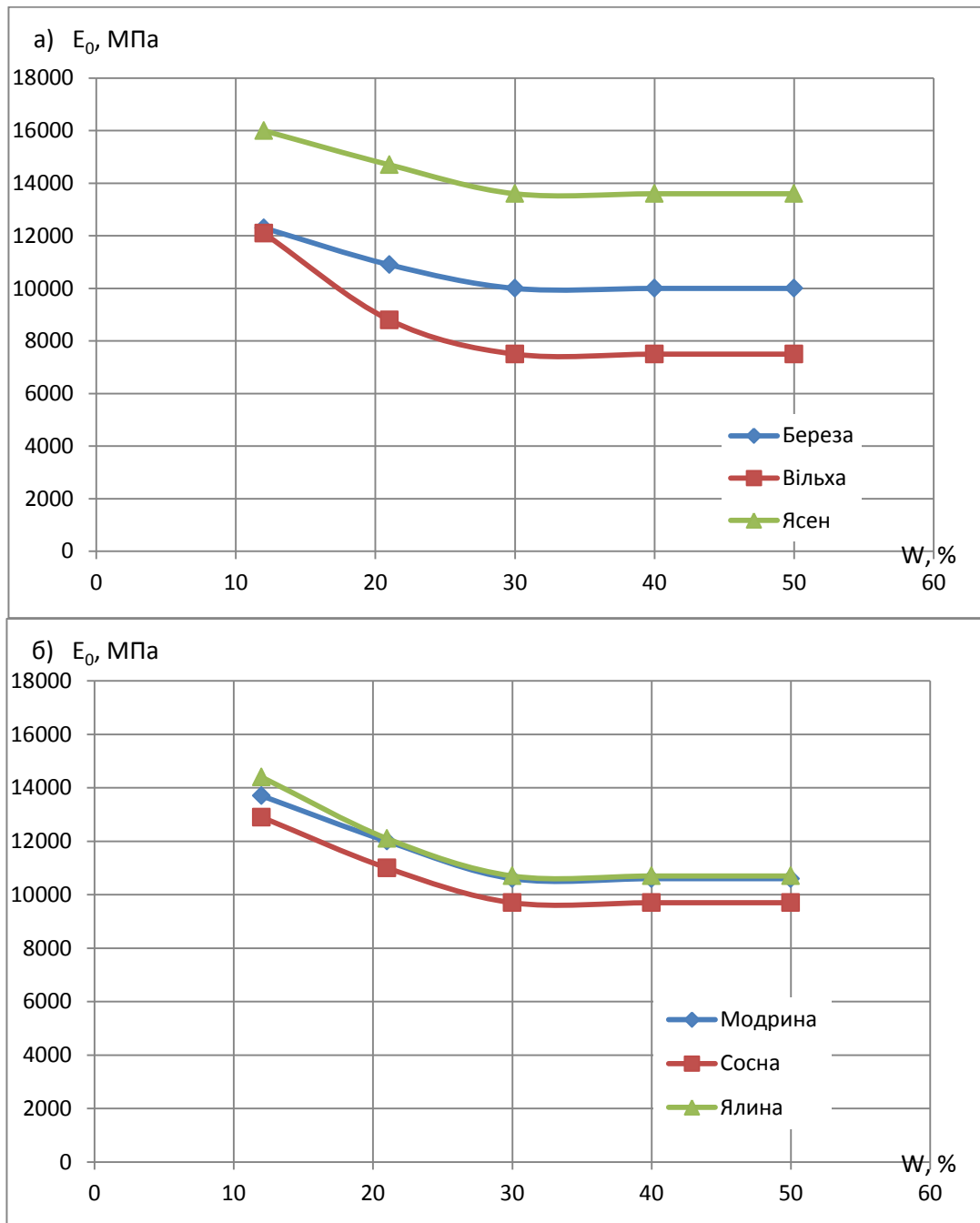


Рис.3.24. Залежність початкового модуля пружності суцільної деревини від вологості: а) листяних порід; б) хвойних порід

І останньою, яку хотілось би показати, є залежність між граничними деформаціями та вологістю (рис.3.26а, рис.3.26б). Оскільки граничні деформації ми встановлювали, моделюючи роботу дерев'яного згинального елемента, то даний графік представляє для нас ще більший інтерес.

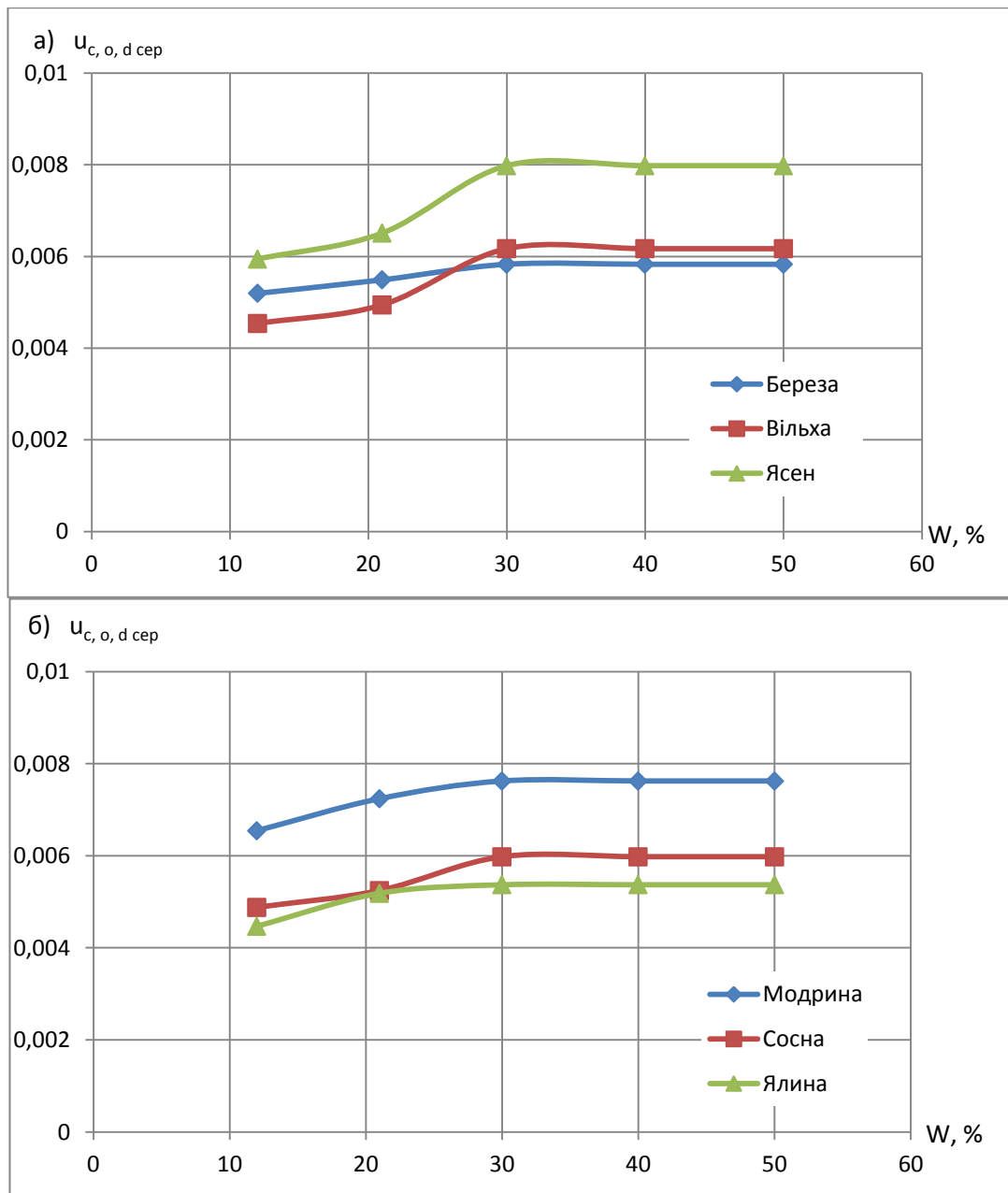


Рис.3.25. Залежність усереднених критичних деформацій (між експериментальними та теоретичними) суцільної деревини від вологості:
а) листяних порід; б) хвойних порід

За допомогою рис.3.26а, рис.3.26б були визначені граничні деформації через кожний 1% вологості (Додаток Гб).

Аналізуючи запропоновані залежності, приходимо до висновку, що основні характеристики діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » змінюються в інтервалі 12-30% вологості, а при $> 30\%$ є константами, що також підтверджується іншими вченими [34, 296, 298].

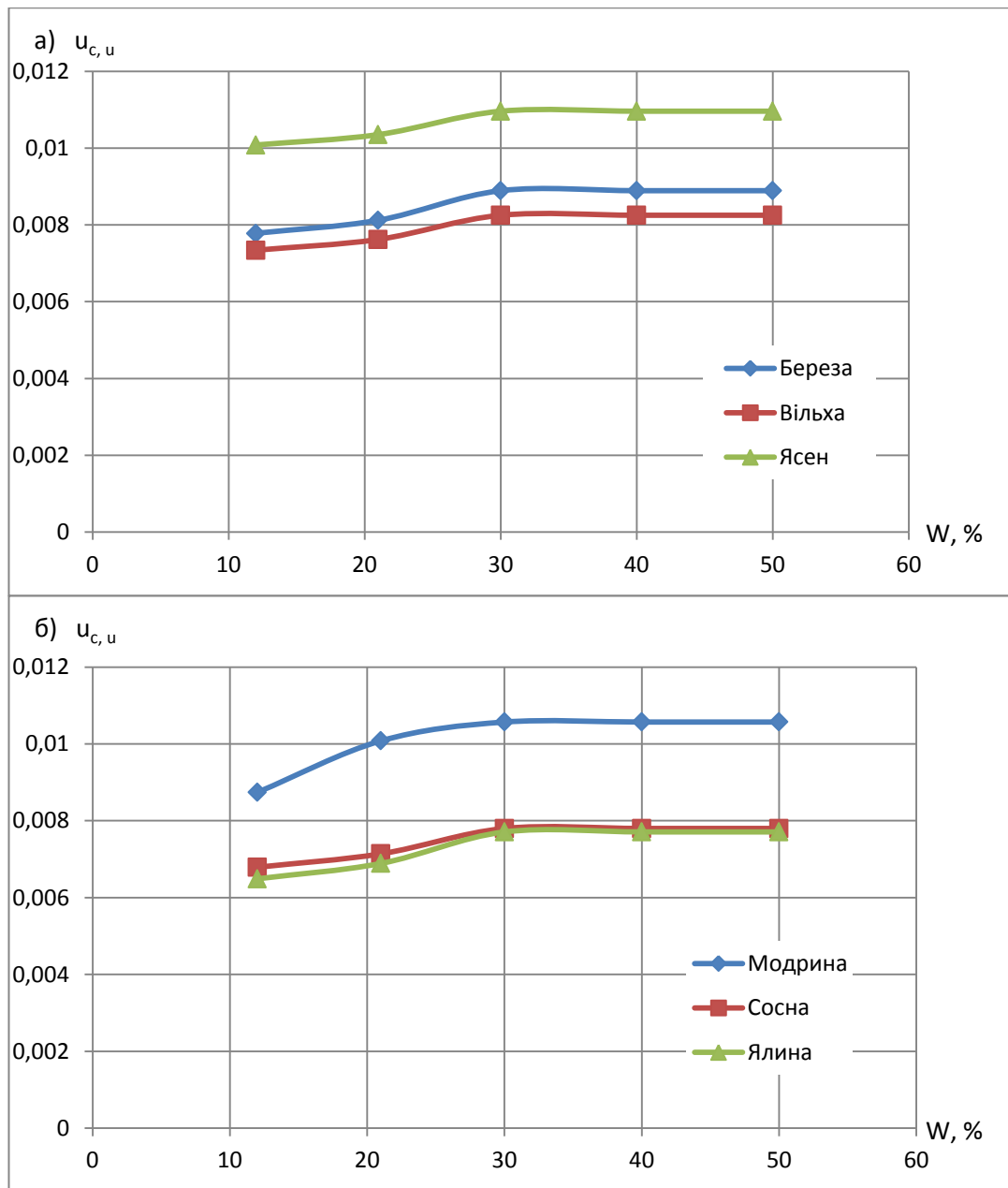


Рис.3.26. Залежність граничних деформацій суцільної деревини від вологості: а) листяних порід; б) хвойних порід

3.4. Поліпшення основних міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини листяних та хвойних порід внаслідок її сушіння

Оскільки головною метою даної роботи є і залишається поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини на основі дійсних діаграм деформування, то доцільно навести покращення основних параметрів, зокрема максимального напруження, критичних та граничних деформацій,

початкового модуля пружності та інших, внаслідок сушіння за допомогою гістограм. Таким чином ми отримаємо повну інформацію поліпшення основних досліджуваних критеріїв, що дасть нам змогу оцінити виконану роботу ще з більшою наглядністю та достовірністю.

Для початку наведемо діаграми з обмеженням в точці граничних деформацій (оптимізованих діаграм) за нашими експериментальними та теоретичними дослідженнями з різними показниками вологості окремо для листяних - берези (рис.3.27а), вільхи (рис.3.27б), ясена (рис.3.27в) та хвойних порід – модрина (рис.3.28а), сосни (рис.3.28б), ялини (рис.3.28в).

А для наочності наших результатів побудуємо гістограми для кожного важливого параметру діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » та тих показників, які ми отримали теоретичним шляхом.

Отже, за результатами експерименту побудуємо гістограму зміни усереднених максимальних напружень від вологості 30, 21 та 12% для всіх досліджуваних порід деревини (рис.3.29).

Таким чином, внаслідок сушіння деревини призм конструкційних розмірів від 30 до 12% міцність деревини збільшується – для зразків деревини берези в 2,33 раза, вільхи в 1,90 раза, ясена в 1,85 раза, модрина в 2,41 раза, сосни в 2,13 раза, ялини в 2,25 раза.

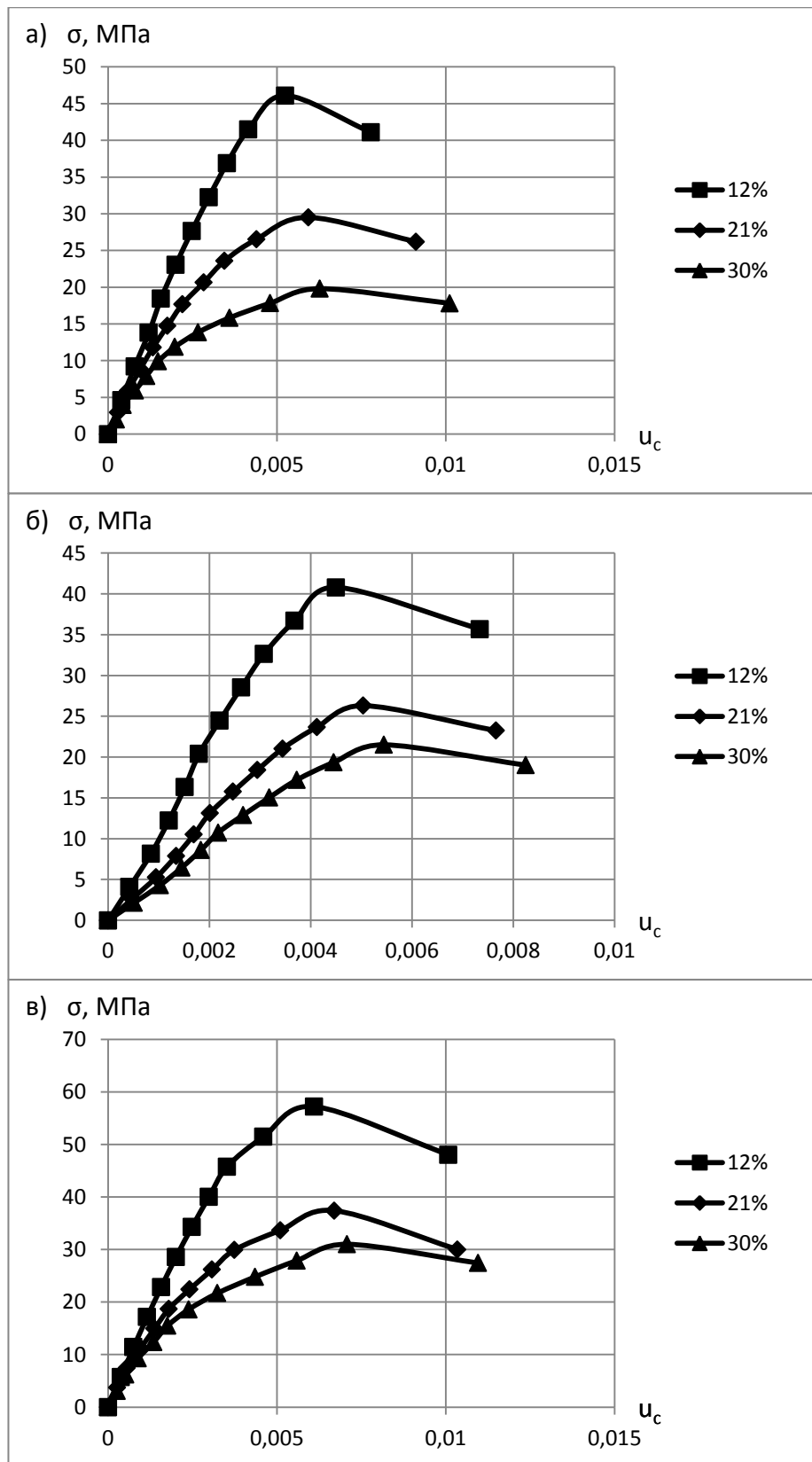


Рис.3.27. Діаграми деформування « σ_c-u_c » суцільної деревини конструкційних розмірів листяних порід з обмеженням в точці граничних деформацій за різної вологості: а) берези; б) вільхи; в) ясенп

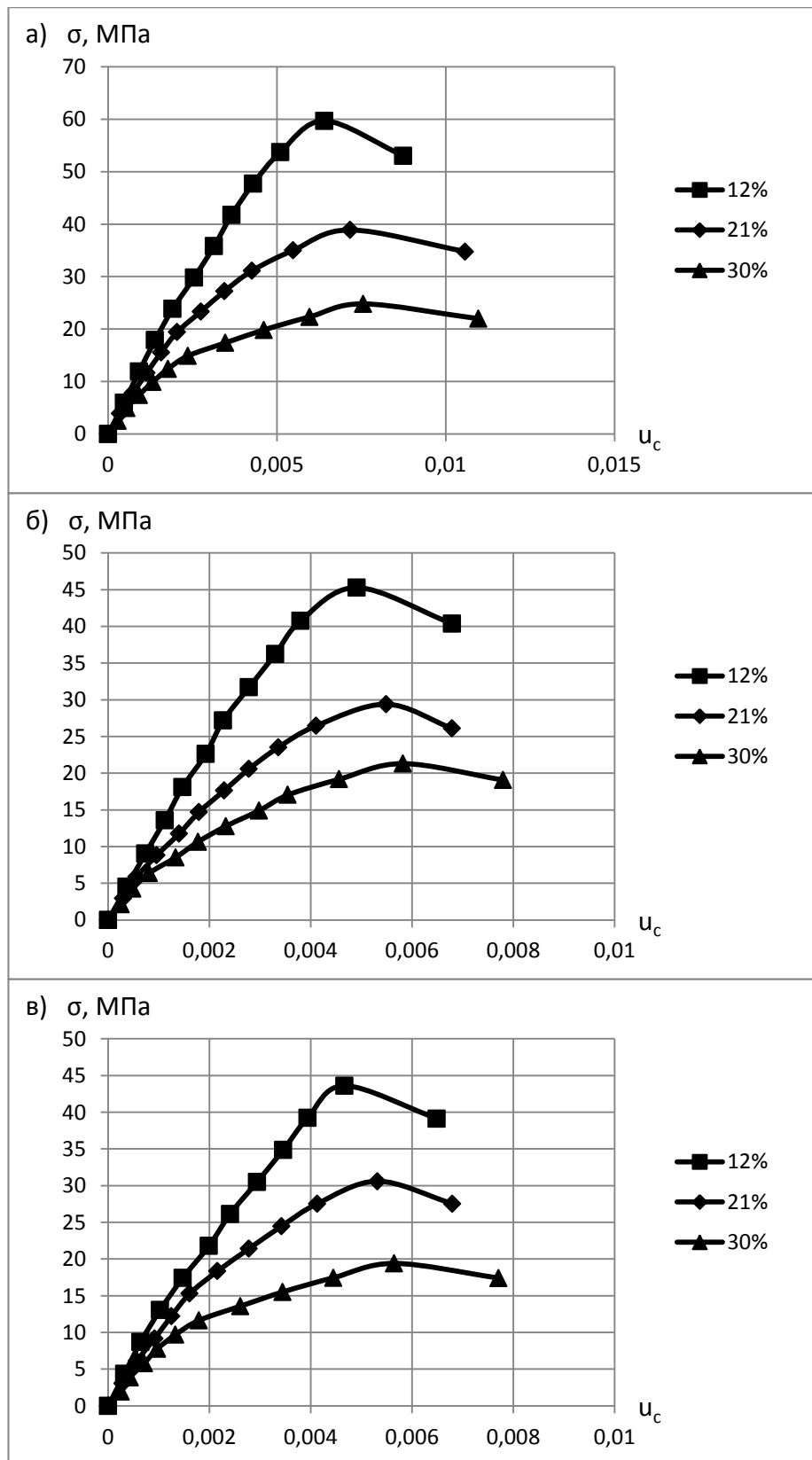


Рис.3.28. Діаграми деформування « σ_c-u_c » суцільної деревини конструкційних розмірів хвойних порід з обмеженням в точці граничних деформацій за різної вологості: а) модрина; б) сосни; в) ялини

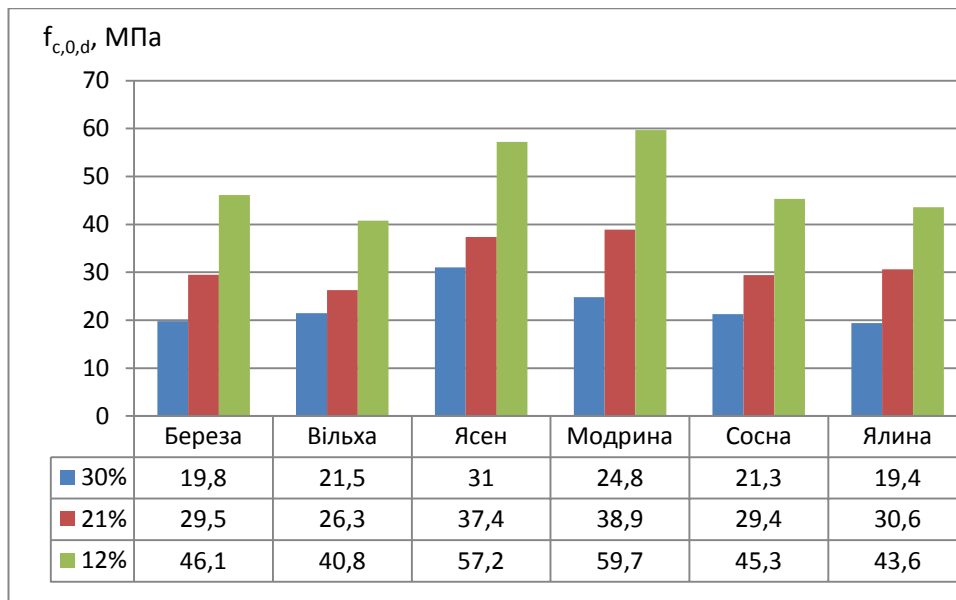


Рис.3.29. Динаміка зміни міцності (за максимального напруження) листяних та хвойних порід деревини за різних показників вологості

Також наведемо динаміку зміни початкового модуля пружності за тих же показників вологості (рис.3.30).

Таким чином початкові модулі пружності всіх досліджуваних порід внаслідок сушіння від 30 до 12% збільшуються, зокрема для берези в 1,23 раза, вільхи – в 1,61 раза, ясена – в 1,18 раза, модрини – в 1,29 раза, сосни – в 1,33 раза, ялини – в 1,35 раза.

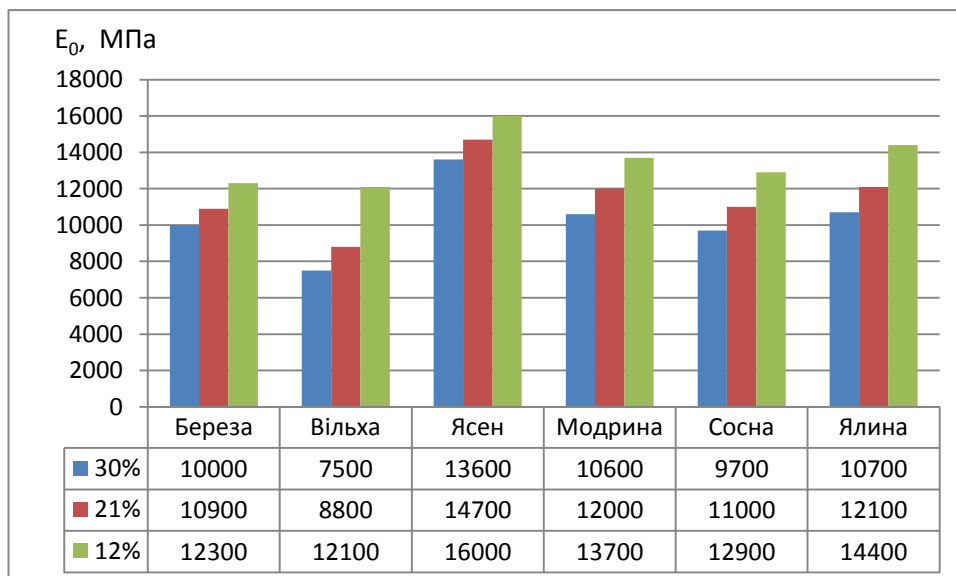


Рис.3.30. Динаміка зміни початкового модуля пружності листяних та хвойних порід деревини за різних показників вологості

Також побудуємо гістограму для критичних деформацій, які визначені експериментальним шляхом (рис.3.31). Динаміка зміни даного показника є наступною: для призм листяних порід - берези зменшується в 1,19 раза, вільхи – в 1,21 раза, ясена – в 1,16 раза; хвойних порід - модрина в 1,18 раза; сосни – в 1,19 раза; ялини – 1,22 раза.

І останнім параметром діаграми «напруження-деформації, для якого побудуємо гістограму, є критерій граничних деформацій (рис.3.32). Для якого також спостерігається зменшення деформівності, зокрема: для берези в 1,14 раза, вільхи – 1,30 раза, ясена – в 1,09 раза, модрина – 1,21 раза, сосни – в 1,15 раза, ялини – в 1,19 раза.

Отже, внаслідок сушіння деревини її основні показники, в цілому, поліпшуються, зокрема міцнісні – збільшуються, а деформівні – зменшуються.

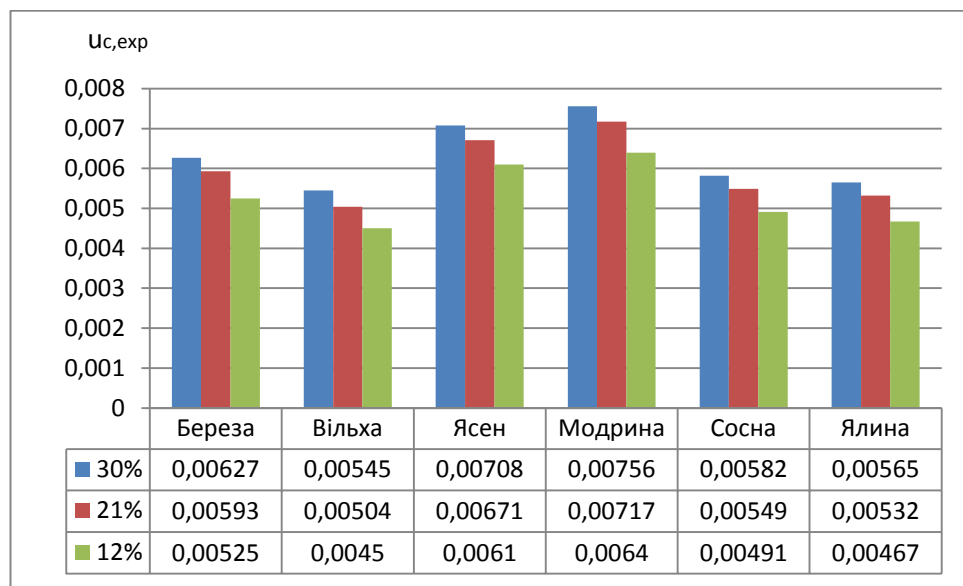


Рис.3.31. Динаміка зміни експериментальних критичних деформацій листяних та хвойних порід деревини за різних показників вологості

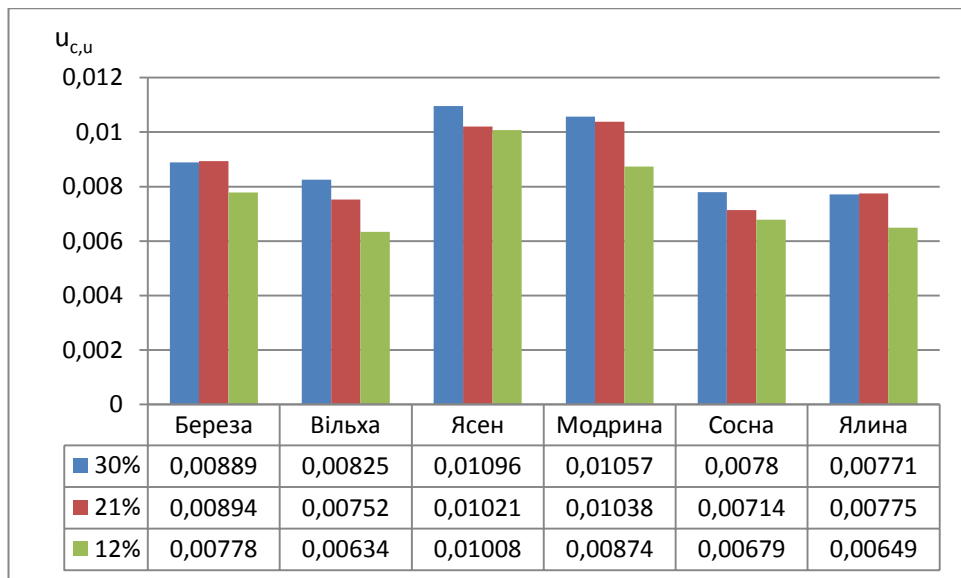


Рис.3.32. Динаміка зміни граничних деформацій листяних та хвойних порід деревини за різних показників вологості

Динаміка зміни інших показників наведено в додатках Б1–Б3.

3.5. Висновки до третього розділу

1. Запропонована методика та сучасне випробувальне обладнання для виконання експериментальних досліджень дозволила отримати достатньо достовірні дані про параметри нелінійності повних діаграм поздовжнього деформування суцільної деревини за дії одноразових короткочасних навантажень вздовж волокон.

2. Вітку діаграми деформування деревини за дії поздовжнього стиску внаслідок переміщення плити випробувальної машини можна поділити на чотири характерні ділянки: дві докритичні та дві закритичні. Перша ділянка – докритична, на яку впливають деформації торцевого обтиснення зразка; друга – від завершення першої ділянки до настання критичних відносних деформацій; третя ділянка – закритична - від точки критичних деформацій до граничних; четверта – від граничних деформацій до остаточних (гіпервеликих).

3. Докритична висхідна ділянка повздовжнього деформування діаграми “ σ_c-u_c ” відповідає стійкому стану повздовжніх волокон деревини, а закритична спадна – нестійкому.

4. Вперше проведено широкомасштабні конструктивні експериментально-теоретичні дослідження впливу вологості на міцнісні та деформівні характеристики суцільної деревини листяних (берези, вільхи, ясена) та хвойних (модрина, сосни, ялини) порід на стиск вздовж волокон за жорсткого прикладання навантаження та побудовані дійсні (повні) діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » від початку завантаження і до руйнування (висхідна та спадна вітки).

5. Встановлено, що пластична складова відносних критичних деформацій зменшується при висушуванні деревини від 30 до 12%, а пружна – навпаки зростає.

6. Встановлено функцію полінома 4-го степеня для апроксимації дійсних (повних) діаграм деформування суцільної деревини за різних показників вологості.

7. Встановлено залежності вологості з основними міцнісними та деформівними параметрами діаграми «напруження σ_c – деформації u_c », зокрема міцності, початкового модуля пружності, критичних та граничних деформацій.

8. Встановлено, що процес сушіння деревини (від 30 до 12%) сприяє поліпшенню основних її міцнісних та деформівних властивостей, зокрема збільшує міцність в 1,85 – 2,33 раза, початковий модуль пружності в 1,18–1,65 раза та зменшує деформівність (критичні деформації в 1,16–1,22 раза) та граничні в 1,09-1,30 раза).

9. Проведено детальний статистичний аналіз експериментально-теоретичних досліджень.

Матеріали розділу 3 наведені в наступних працях [41, 44, 45, 53-55, 57, 58, 64, 66-68, 242-244, 275, 337].

РОЗДІЛ 4

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

4.1. Вплив віку на міцнісні та деформівні властивості суцільної деревини (I серія випробувань)

Одним із факторів, які ми будемо розглядати в даній роботі, є вплив віку деревини на основні міцнісні та деформівні властивості зразків суцільної деревини. Експериментальні дослідження проводилися за жорського режиму випробувань (за переміщенням плити випробувальної машини) одноразовим короткочасним навантаженням уздовж волокон хвойних та листяних порід також в III етапи:

I етап – вік деревини 60 років, вологість 12%, швидкість завантаження – 1,5 мм/хв;

II етап – вік деревини 40 років, вологість 12%, швидкість завантаження – 1,5 мм/хв;

III етап – вік деревини 20 років, вологість 12%, швидкість завантаження – 1,5 мм/хв.

В минулому є досить обмежена кількість наукових праць, де б проводилися такі дослідження. Отже, дані експериментальні дослідження більш ширше розкриють основні міцнісні та деформівні властивості різних порід деревини, особливо враховуючи фактор віку.

4.1.1. Визначення основних міцнісних та деформівних властивостей деревини віком 40 років

Перший етап експериментальних випробувань був повністю розкритий в попередньому розділі. В даному параграфі будемо описувати результати

досліджень листяних та хвойних порід у віці 40 років за тими 4 ділянками, які ми описували в попередньому розділі. *Порівняння міцнісних та деформівних показників всіх досліджуваних порід деревини у віці 40 років будемо проводити в порівнянні зі зразками віком 60 років (п. 3.3).*

4.1.1.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c »

На основі експериментальних досліджень були побудовані повні діаграми деформування «напруження σ_c – деформації u_c » суцільної деревини хвойних та листяних порід віком 40 років за стандартної вологості 12% (рис.4.1а, рис.4.1б). Були визначені основні показники міцності та деформівності на всіх 4 ділянках.

На всіх ділянках повних діаграм «напруження–деформації» спостерігалось невелике зменшення міцнісних та деформівних показників всіх досліджуваних порід деревини, тому зупинимось тільки на тих, які будемо використовувати в подальшому для аналізу та порівняння.

На першій ділянці (висхідна вітка діаграми) напруження і відносні деформації фактично мали ті ж показники, що і для віку 60 років: для зразків деревини берези напруження складало $\sigma_{cI} = 8,7$ МПа, відносні деформації досягли позначки $u_{cI} = 0,00069$; вільхи – $\sigma_{cI} = 7,0$ МПа, $u_{cI} = 0,00074$; ясена – $\sigma_{cI} = 8,2$ МПа, $u_{cI} = 0,00063$; модрина – $\sigma_{cI} = 8,6$ МПа, $u_{cI} = 0,00067$; сосни – $\sigma_{cI} = 7,1$ МПа, $u_{cI} = 0,00058$; ялини – $\sigma_{cI} = 6,9$ МПа, $u_{cI} = 0,00055$ (зменшились на 9%).

Більш детально зупинимось на другій ділянці. Отже, за віку 40 років верхня максимальна точки діаграми мала наступні значення (рис.4.1а, рис.4.1б): для деревини берези максимальні напруження зменшились на 5,9% та досягли позначки $f_{c,0,d} = 43,1$ МПа, критичні деформації також дещо зменшилися і були зафіксовані на відмітці $u_{c,0,d,exp} = 0,00509$; вільхи максимальні напруження – на 9,7% ($f_{c,0,d} = 37,2$ МПа), критичні деформації – на 4,4% ($u_{c,0,d,exp} = 0,00431$); ясена міцність – на 6,5 % ($f_{c,0,d} = 54,2$ МПа), деформівність фактично залишилась за тих же показників ($u_{c,0,d,exp} = 0,00597$); деревини модрина максимальні напруження

впали на 6,4 % ($f_{c,0,d}=56,1$ МПа), а критичні деформації – на 2,4% ($u_{c,0,d,exp}=0,00626$); сосни міцність – на 5,1% ($f_{c,0,d}=43,1$ МПа), деформівність – на 2,1% ($u_{c,0,d,exp}=0,00481$); ялини максимальні напруження практично не змінилися ($f_{c,0,d}=40,2$ МПа), критичні деформації – на 3,5% ($u_{c,0,d,exp}=0,00451$).

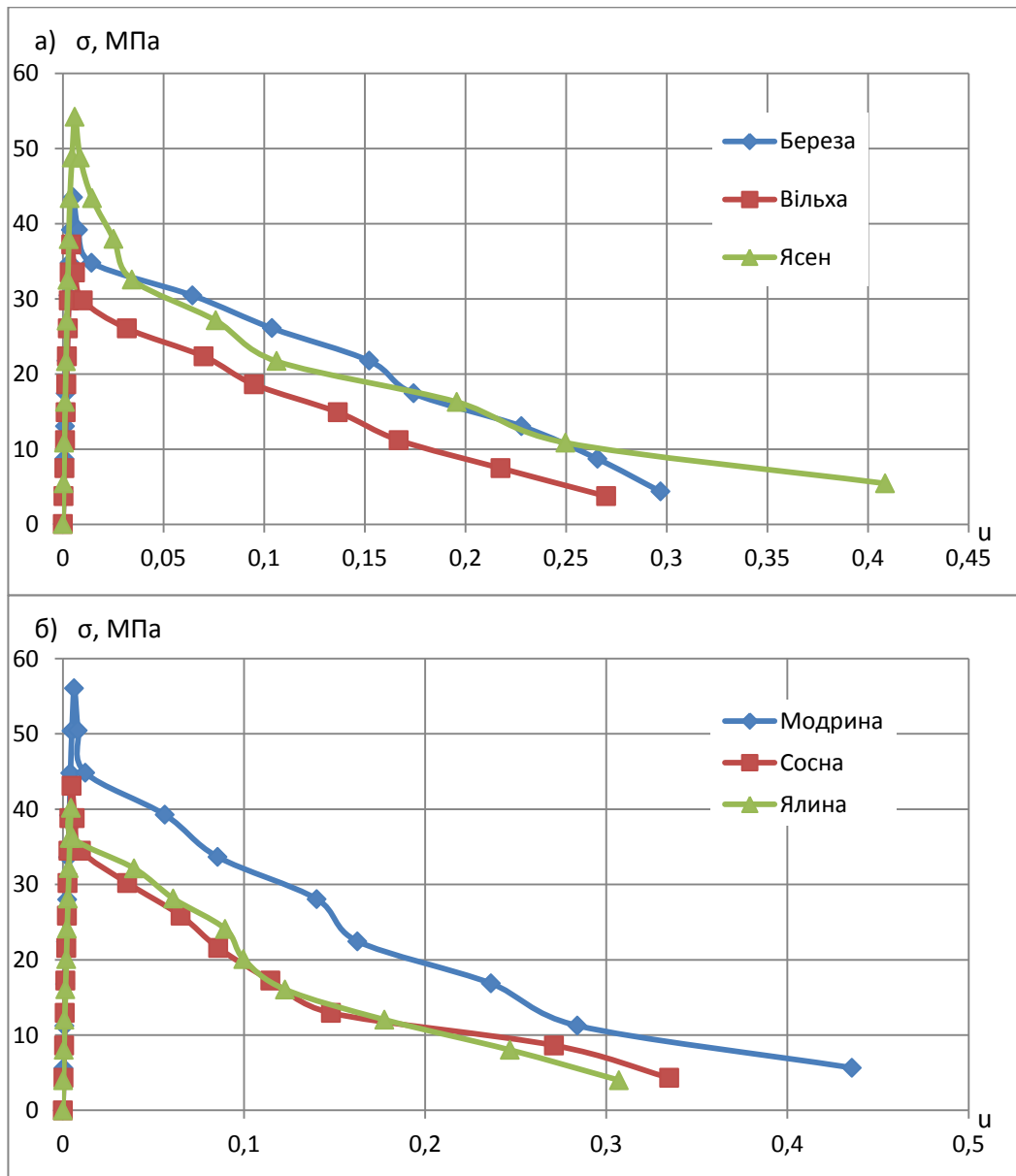


Рис.4.1. Дійсні (повні) діаграми деформування суцільної деревини віком 40 років за стандартної вологості 12%): а) листяних порід; б) хвойних порід

Отже, міцність хвойних та листяних порід віком 40 років (в порівнянні з віком 60 років) на даній ділянці зменшується на 9,7%, а деформівність – до 4,4%.

Аналіз третьої ділянки буде проаналізований в п.4.1.1.1.4.

На четвертій ділянці наведемо тільки остаточні деформації за напружень $\sigma_4=0,1f_{c,0,d}$, оскільки далі відбувалося руйнування зразків, а потім їх повне розвантаження. Відносні остаточні деформації також дещо зменшувались, як і критичні деформації, і мали місце наступні значення: призми берези зменшились на 24,2% та досягли позначки $u_{c,fin}=0,2970$; вільхи – на 4,6% ($u_{c,fin}=0,2699$); ясена – на 2,1% ; ($u_{c,fin}=0,4161$); модрина – на 3,3% ($u_{c,fin}=0,4357$); сосни практично не змінилися ($u_{c,fin}=0,3348$); ялини – на 13,1% ($u_{c,fin}=0,3070$).

Таким чином, за віку 40 років на всіх ділянках діаграми спостерігалось незначне зменшення міцності та деформівності в порівнянні з віком 60 років, окрім останньої ділянки, де остаточні деформації деревини берези та ялини були значно меншими.

4.1.1.2. Початковий модуль пружності деревини та модуль деформацій (січний) деревини у віці 40 років

На основі тих же експериментальних досліджень побудовані діаграми «модуль деформацій – рівень напружень» (рис.4.2а, рис.4.2б) та визначені початкові модулі пружності досліджуваних зразків деревини, а також встановлені модулі деформацій протягом роботи призм віком 40 років в межах $(0,2...0,8)\eta$.

Таким чином були отримані наступні значення початкового модуля пружності різних порід для деревини віком 40 років E_0 , які незначно зменшились в порів'язанні з віком 60 років: берези $E_0=12100$ МПа; вільхи $E_0=11700$ МПа; ясена $E_0=15400$ МПа; модрина $E_0=13200$ МПа; сосни $E_0=12500$ МПа; ялини $E_0=13700$ МПа.

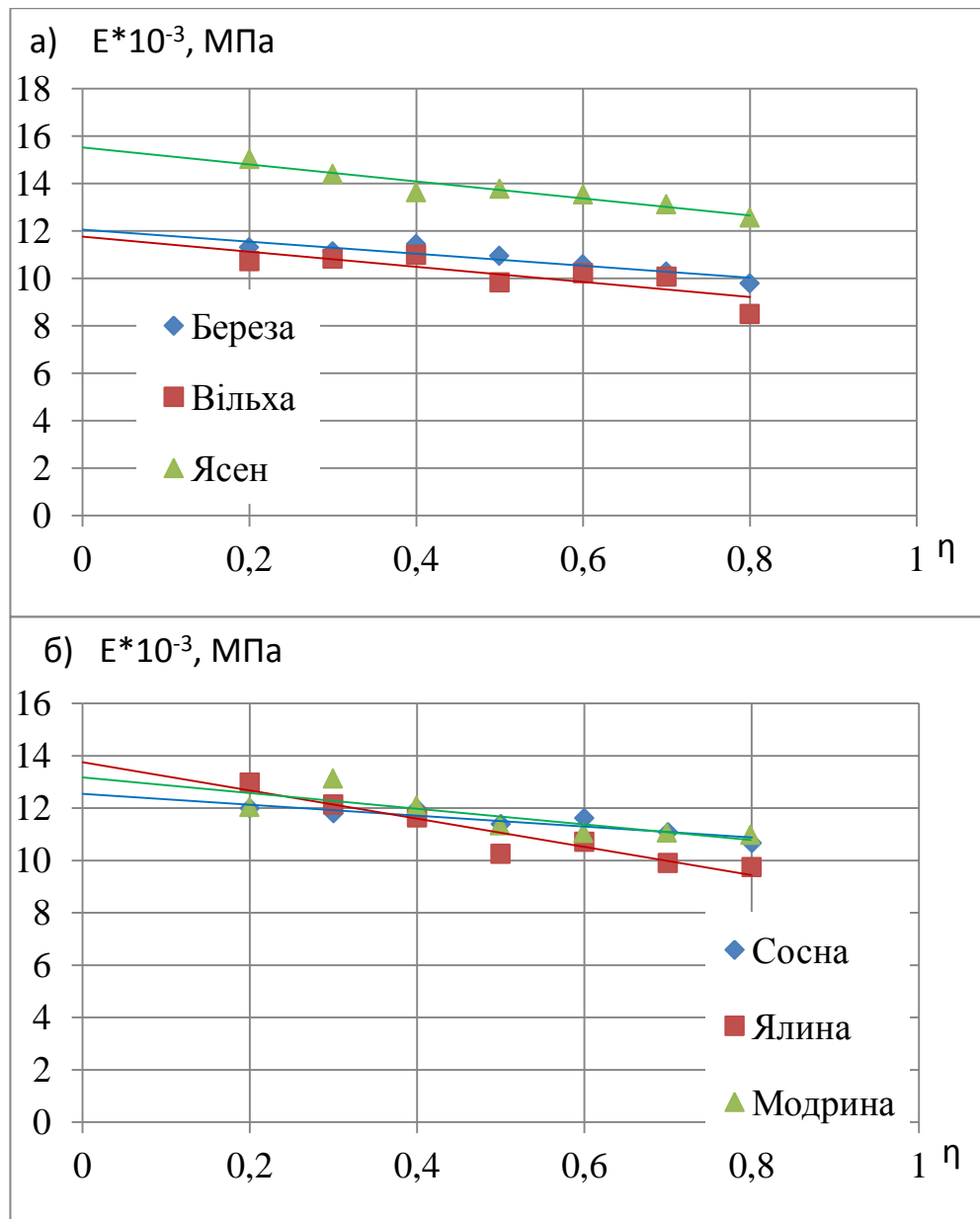


Рис.4.2. Діаграми «E- η » (січний модуль – рівень напружень) різних порід суцільної деревини у віці 40 років за вологості 12%: а) листяних; б) хвойних

Аналогічним чином визначимо зміну модуля деформацій у віці деревини 40 років від початкового модуля пружності до значень, що відповідають рівню напружень $\eta=0,8$ (рис.4.2а, рис.4.2б):

- для деревини берези зменшується на 21%; вільхи – на 30%; ясена – на 23%; модрина – на 20%; сосни – на 17%; ялини – на 43%.

Отже, для хвойних та листяних порід модуль деформацій змінюється в діапазоні від 17% до 43%.

Основні параметри і дані статистичної обробки кореляційних рівнянь регресії суцільної деревини (січний модуль – рівень напружень) у віці 40 років за вологості 12% приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії суцільної деревини у віці 20 років за вологості 12%

Назва зразка	Кореляційне рівняння	r	m_r	r/m_r	$V, \%$
БС-12-40-1,5	$E' = 12,138 \cdot (1 - 0,045 \cdot \eta)$	0,901	0,071	13	1,71
ВС-12-40-1,5	$E' = 11,757 \cdot (1 - 0,106 \eta)$	0,886	0,068	11	3,81
ЯсС-12-40-1,5	$E' = 15,487 \cdot (1 - 0,066 \cdot \eta)$	0,998	0,001	740	3,13
СС-12-40-1,5	$E' = 12,540 \cdot (1 - 0,048 \cdot \eta)$	0,905	0,068	13	1,72
МС-12-40-1,5	$E' = 13,291 \cdot (1 - 0,060 \cdot \eta)$	0,966	0,025	13	1,78
ЯлС-12-40-1,5	$E' = 13,726 \cdot (1 - 0,139 \cdot \eta)$	0,969	0,023	42	2,57

4.1.1.3. Критичні відносні деформації суцільної деревини у віці 40 років

На основі експериментальних досліджень та повних діаграм деформування «напруження-деформації» суцільної деревини віком 40 років $u_{c,0,d,exp}$ (рис.4.1а, рис.4.1б) визначаємо критичні деформації всіх зразків окремо для кожної породи. Усередненні значення критичних деформацій заносимо до табл.4.2.

Критичні деформації суцільної деревини листяних та хвойних порід віком 40 років $u_{c,0,d,th}$ знаходимо теоретичним шляхом за формулою (2.9) (табл.4.2). При цьому коефіцієнт складає $c_1 = 8,01 \cdot 10^{-7}$ (МПа)² однаковий для будь-яких листяних та хвойних порід.

Аналізуючи, критичні деформації, які отримані теоретичним шляхом за формулою (2.9), та окремо їх пружну та пластичну складові приходимо до

висновку, що вони в основному незначно зменшилися в порівнянні зі зразками віком 60 років.

Таблиця 4.2

Значення експериментальних та теоретичних показників усереднених критичних деформацій суцільної деревини віком 40 років

№п/п	Порода деревини	К-сть призм шт.	Переріз зразків, мм	$f_{c,0,d}$ МПа	E_0 , МПа	$u_{c,0,d,exp}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,0,d,th}$
1	Береза	6	30x30x120	43,5	12100	0,00509	0,00360	0,00151	0,00511
2	Вільха	6	30x30x120	37,2	11700	0,00431	0,00318	0,00111	0,00429
3	Ясен	6	30x30x120	54,2	15600	0,00597	0,00347	0,00236	0,00583
4	Модрина	6	30x30x120	56,1	13200	0,00626	0,00425	0,00252	0,00677
5	Сосна	6	30x30x120	43,1	12500	0,00481	0,00345	0,00149	0,00494
6	Ялина	6	30x30x120	40,2	13700	0,00451	0,00293	0,00130	0,00423

Проведемо статистичний аналіз отриманих експериментальних та теоретичних результатів досліджень за всіма 36-ма зразками хвойних та листяних порід суцільної деревини віком 40 років (рис.4.3), (табл.4.3).

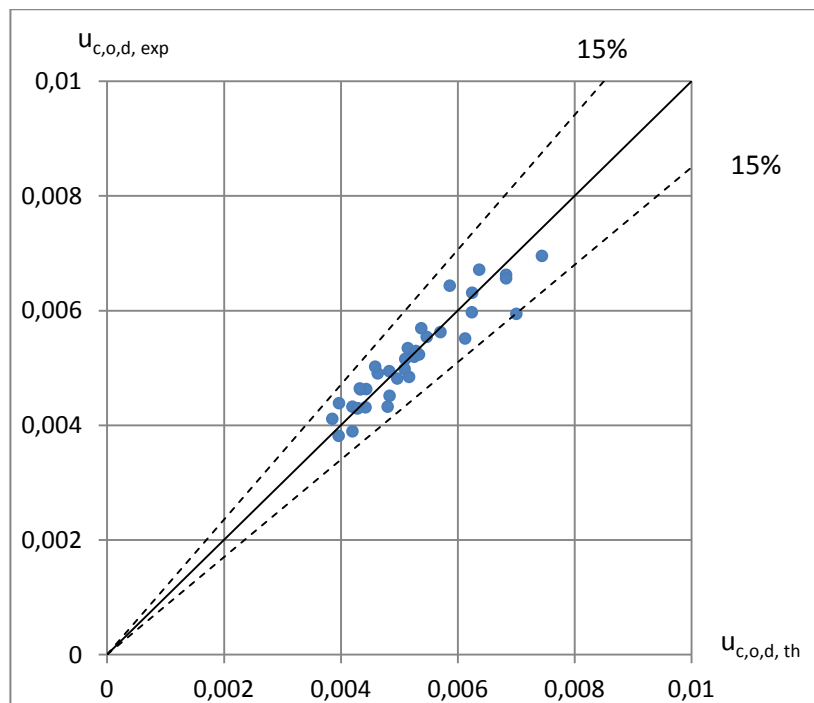


Рис.4.3. Відхилення експериментальних значень критичних деформацій від теоретичних за формулою автора (2.9) суцільної деревини листяних та хвойних порід віком 40 років

Статистична оцінка формули автора (2.9) з визначення критичних деформацій суцільної деревини листяних та хвойних порід віком 40 років

Формула для визначення критичних деформацій	Відхилення від експериментальних значень, %				
	$\Delta_{u,1}$	$\Delta_{u,2}$	Δ_u	σ_u	$\Delta_{u,max}$
$u_{c,0,d} = f_{c,0,d} / E_c + c_1 \cdot f_{c,0,d}^2,$ де $c_1 = 8,01 \cdot 10^{-7} \text{ (МПа)}^{-2}$	-10,13	15,27	0,34	6,03	15,27
36 зразків. $\Delta_{u,1}$, $\Delta_{u,2}$ – нижня та верхня межі відхилень від експериментальних значень; Δ_u , σ_u – середньоарифметичні та стандартні значення цих відхилень; $\Delta_{u,max}$ – максимальне з $\Delta_{u,1}$ і $\Delta_{u,2}$.					

Отже, аналізуючи отримані дані, що представлені на рис.4.3 та табл.4.3. приходимо до висновку, що збіжність теоретичних та експериментальних значень відносних критичних деформацій деревини за віку 40 років є задовільною незалежно від породи деревини. Максимальна розбіжність складає $\Delta_{u,max}=15,27\%$.

4.1.1.4. Граничні деформації суцільної деревини у віці 40 років

Аналогічним чином, як і для віку 60 років, встановлюємо граничні деформації листяних та хвойних порід деревини. Спочатку визначаємо коефіцієнти поліному w_1, w_2, w_3, w_4 запропонованої функції (2.5), а також послідовно записуємо необхідні міцнісні та деформівні характеристики, які були знайдені в попередніх пунктах, зокрема критичні деформації розтягу $u_{t,0,d}$ та стиску $u_{c,0,d}$ вздовж волокон, а також початкового модуля пружності (табл.4.3).

Після знаходження коефіцієнтів поліному (2.5) будуємо діаграми «момент–кривина» всіх досліджуваних порід деревини віком 40 років (рис.4.4а, рис.4.4б) на основі алгоритму (рис.2.20).

Побудовані графіки (рис.4.4а, рис.4.4б) трансформуємо в діаграми «момент–деформації» (рис.4.5а, рис.4.5б) та встановлюємо значення граничних деформацій віком 40 років (табл.4.4).

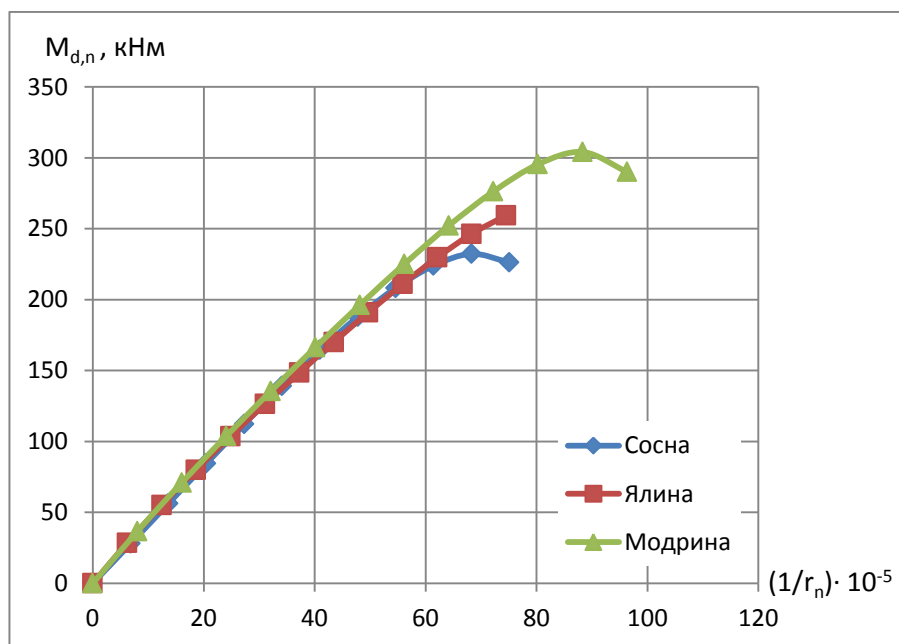
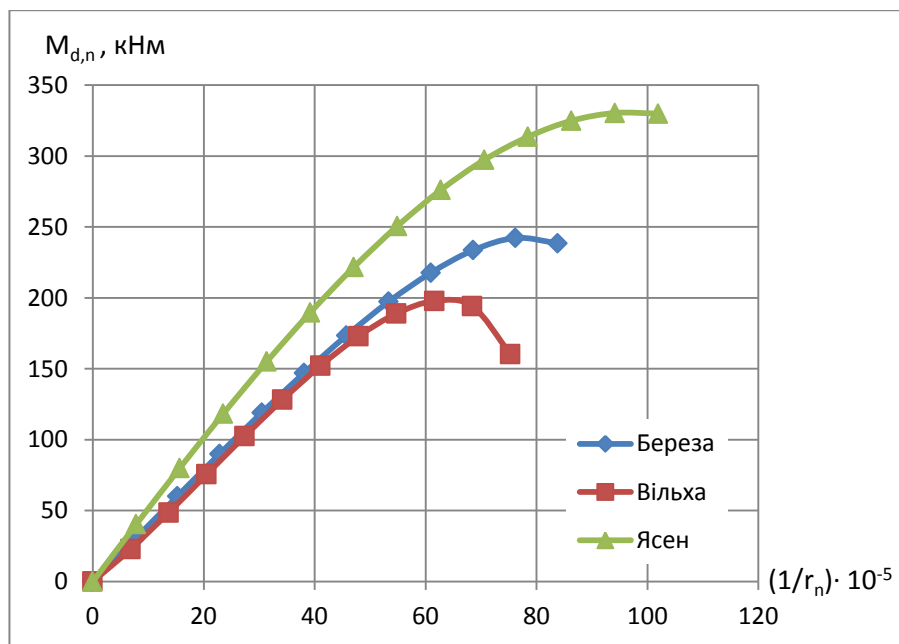


Рис.4.4. Діаграми «момент–кривина» віком 40 років відповідно:
а) листяних порід; б) хвойних порід

Отже, граничні деформації віком 40 років (III ділянка, спадна вітка діаграми) так, як і для критичних деформацій незначно зменшилися (табл. 4.3).

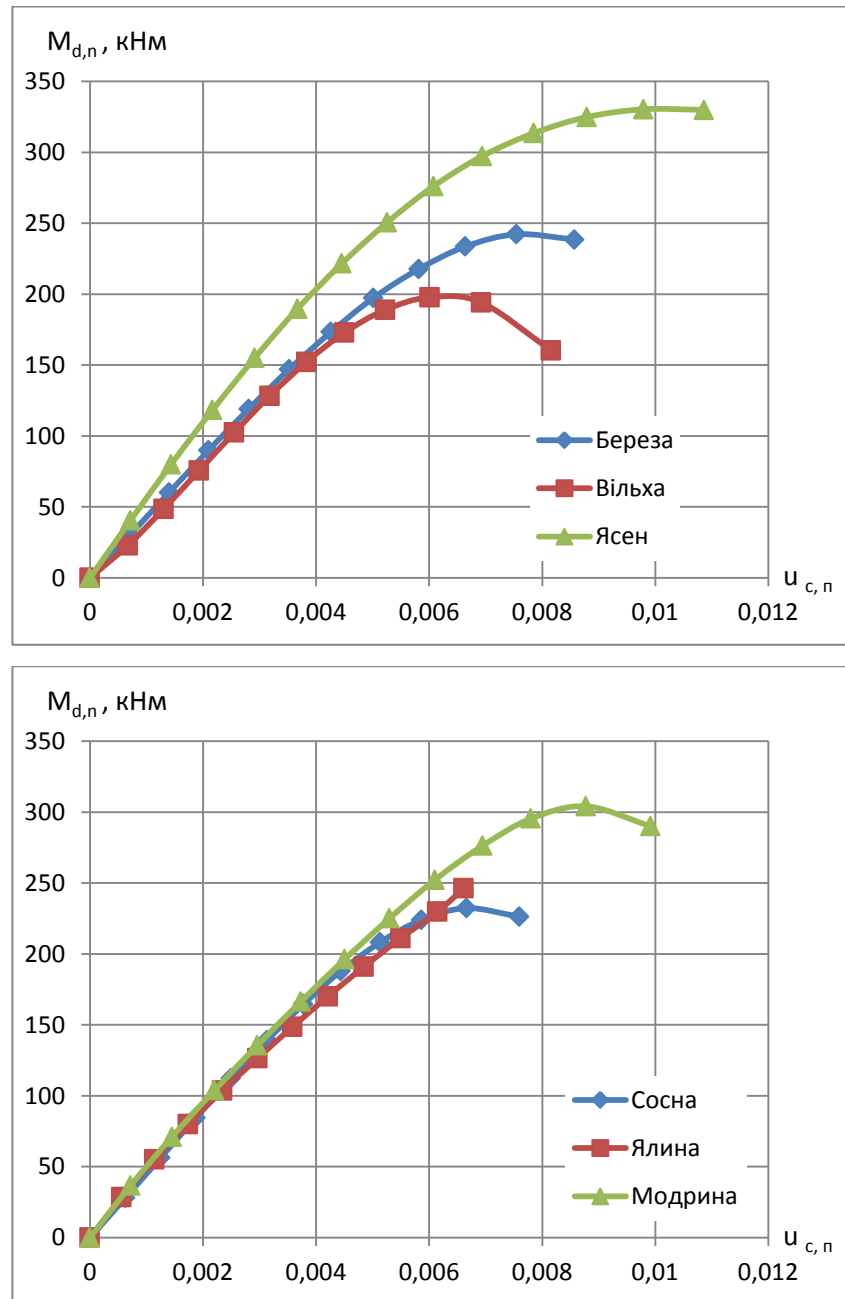


Рис.4.5. Діаграми «момент–деформації» віком 40 років відповідно:
 а) листяних порід; б) хвойних порід

Визначено співвідношення граничних деформацій до критичних (експериментальні значення) для суцільної деревини у віці 40 років:

- берези $u_{c,u}=1,48u_{c,0,d}$;
- вільхи $u_{c,u}=1,61u_{c,0,d}$;
- ясена $u_{c,u}=1,64u_{c,0,d}$;
- модрина $u_{c,u}=1,40u_{c,0,d}$;
- сосни $u_{c,u}=1,38u_{c,0,d}$;
- ялини $u_{c,u}=1,47u_{c,0,d}$.

Таблиця 4.4

До визначення усереднених граничних деформацій суцільної деревини
віком 40 років

Породи деревини	Коефіцієнти поліному (3.5)				$u_{c,0,d}$	$u_{t,0,d}$	E_0 , МПа	$u_{c,u}$
	w_1	w_2	w_3	w_4				
Береза	10975	1692	-4144	11	0,00509	0,00863	12100	0,00755
Вільха	6986	14728	-15548	2938	0,00431	0,00801	11700	0,00602
Ясен	14986	-1439	-6433	2059	0,00597	0,00815	15600	0,00979
Модрина	14616	-12806	15158	-8013	0,00626	0,00819	13200	0,00877
Сосна	11496	2288	-3936	-892	0,00481	0,00748	12500	0,00666
Ялина	14317	-11697	10216	-3657	0,00451	0,00667	13700	0,00661

4.1.1.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження-деформації» у віці 40 років

Аналогічним чином, встановлюємо достовірність запропонованої функції (2.5) через апроксимацію діаграм механічного стану всіх порід деревини, як для повних діаграм деформування, так і з обмеженням в точці граничних деформацій віком 40 років. Для цього визначимо всі коефіцієнти поліному w_1 , w_2 , w_3 , w_4 : для діаграми з обмеженням в точці граничних деформацій наведені в табл. 4.5, а для повної - наведені в табл. 4.6.

Діаграми деревини з обмеженням в точці граничних деформацій побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) віком 40

років для деревини ясена наведені на рис.4.6а, а для деревини модрини на рис.4.6б; повних – ясена (рис.4.7а), ялини (рис.4.7б).

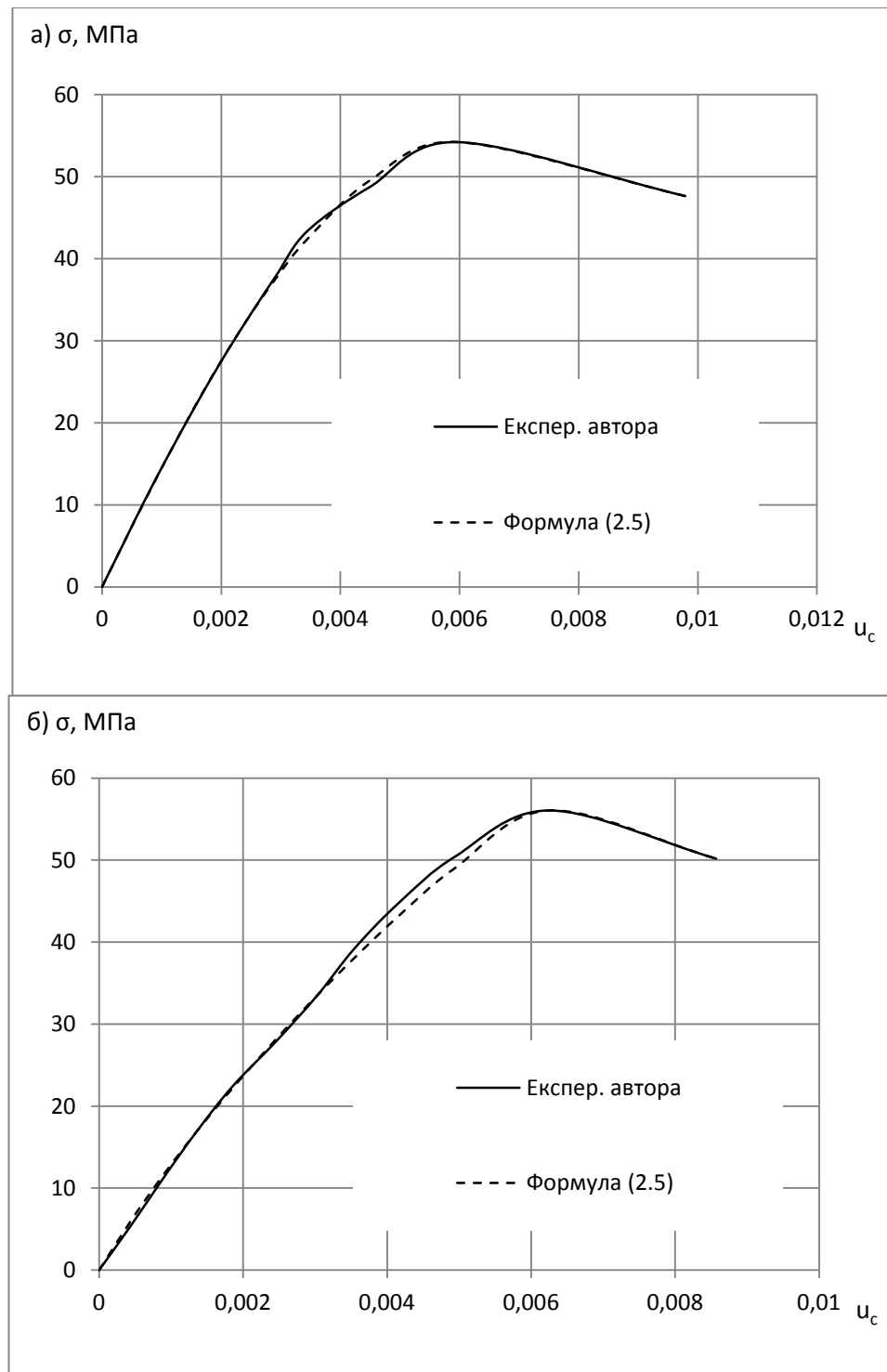


Рис.4.6. Діаграми деревини з обмеженням в точці граничних деформацій побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) віком 40 років: а) ясена; б) модрини

Для інших порід деревини носить подібний характер.

Збіжність результатів є дуже високою та в більшій мірі прямує до 1 (Табл.4.5).

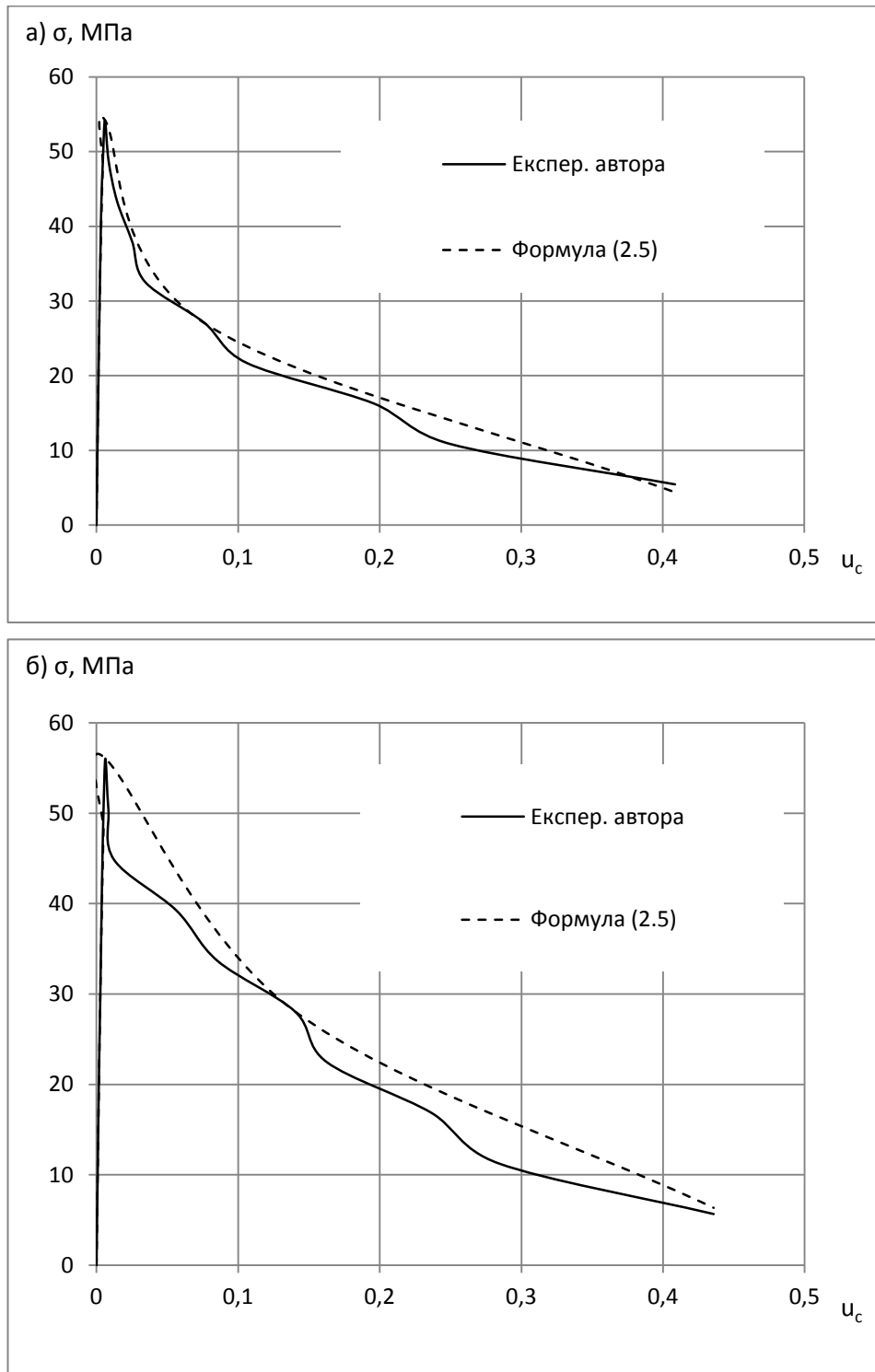


Рис.4.7. Дійсні (повні) діаграми деревини побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) віком 40 років:

а) ясена; б) модрины

Збіжність даних результатів віком 40 років є також досить високою та знаходиться в межах $\eta=0,970\dots0,994$.

Таблиця 4.5

Результати апроксимації діаграм листяних та хвойних порід деревини віком 40 років з обмеженням в точці граничних деформацій

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (2.5) та дослідних значень η
	w_1	w_2	w_3	w_4	
Береза	10838,85	2707,87	-6277,03	1264,25	0,999
Вільха	6589,58	16969,98	-20880,68	-5974,17	0,999
Ясен	14859,30	-1115,01	-7200,13	2539,58	0,999
Модрина	14359,78	-10831,05	10986,93	5560,96	0,999
Сосна	11222,62	4351,99	8322,02	1703,31	0,999
Ялина	14821,14	-15740,67	17919,79	-8094,30	0,999

Таблиця 4.6

Результати апроксимації повних діаграм листяних та хвойних порід деревини віком 40 років

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (2.5) та дослідних значень η
	w_1	w_2	w_3	w_4	
Береза	12934,92	-4606,27	207,77	-2,27	0,984
Вільха	11848,68	-2122,15	-1113,71	18,27	0,994
Ясен	16262,53	-7778,42	605,20	-7,23	0,994
Модрина	13011,56	-4269,63	215,59	-2,25	0,970
Сосна	13087,07	-4374,36	254,75	-2,80	0,974
Ялина	11638,75	-2806,82	-1430,97	26,02	0,990

Отже, функція (2.5) в повній мірі підходить для апроксимації, як повних діаграм деформування зразків конструкційних розмірів, так і з обмеженням в точці граничних деформацій віком 40 років.

4.1.2. Визначення основних міцнісних та деформівних властивостей деревини віком 20 років

4.1.2.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c » віком 20 років

За результатами експерименту зразків деревини хвойних та листяних порід перерізом 30x30x120 мм віком 20 років за повздовжнього стику одноразовим короткочасним навантаженням отримані дійсні (повні) діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » (рис.4.8а, рис.4.8б) та визначені основні міцнісні та деформівні параметри на всіх чотирьох ділянках.

Аналіз будемо проводити в порівнянні з призмами, які були досліджені у віці 40 років.

На першій ділянці за результатами випробувань були отримані наступні показники:

– для листяних порід: деревини берези напруження є меншим на 40,3% і складають $\sigma_{cl}= 6,1$ МПа за відносних деформацій $u_{cl}=0,00058$ (менше на 18,9%) в порівнянні з аналогічними випробуваннями у віці 40 років; вільхи напруження досягли позначки $\sigma_{cl}= 5,7$ МПа (на 22,8% менше), а деформівність впала на 5,7% - $u_{cl}=0,00070$; ясена на даній ділянці мали міцність $\sigma_{cl}= 7,1$ МПа, що на 15,5% менше, при цьому відносні деформації стали менше на 23,5% - $u_{cl}=0,00051$.

– для хвойних порід: деревини модрина напруження були зафіксовані на позначці $\sigma_{cl}= 7,5$ МПа (на 14,7% менше), відносні деформації практично залишились на тих же відмітках $u_{cl}=0,00064$; сосни напруження зазнали змін у меншу сторону на 29,1% - $\sigma_{cl}= 5,5$ МПа, деформівність стала також меншою на

9,4% - $u_{cl}=0,00053$; міцність зразків ялини на даній ділянці незначно зменшилася $\sigma_{cl}= 6,6$ МПа, а деформівність залишилась фактично незмінною - $u_{cl}=0,00055$.

Таким чином, на кінець першої ділянки міцнісні та деформівні властивості суцільної деревини, в цілому, зменшуються в порівнянні із зразками, які були випробувані у віці 40 років (напруження стають меншими в межах 4,5–40,3%, відносні деформації до 23,5%).

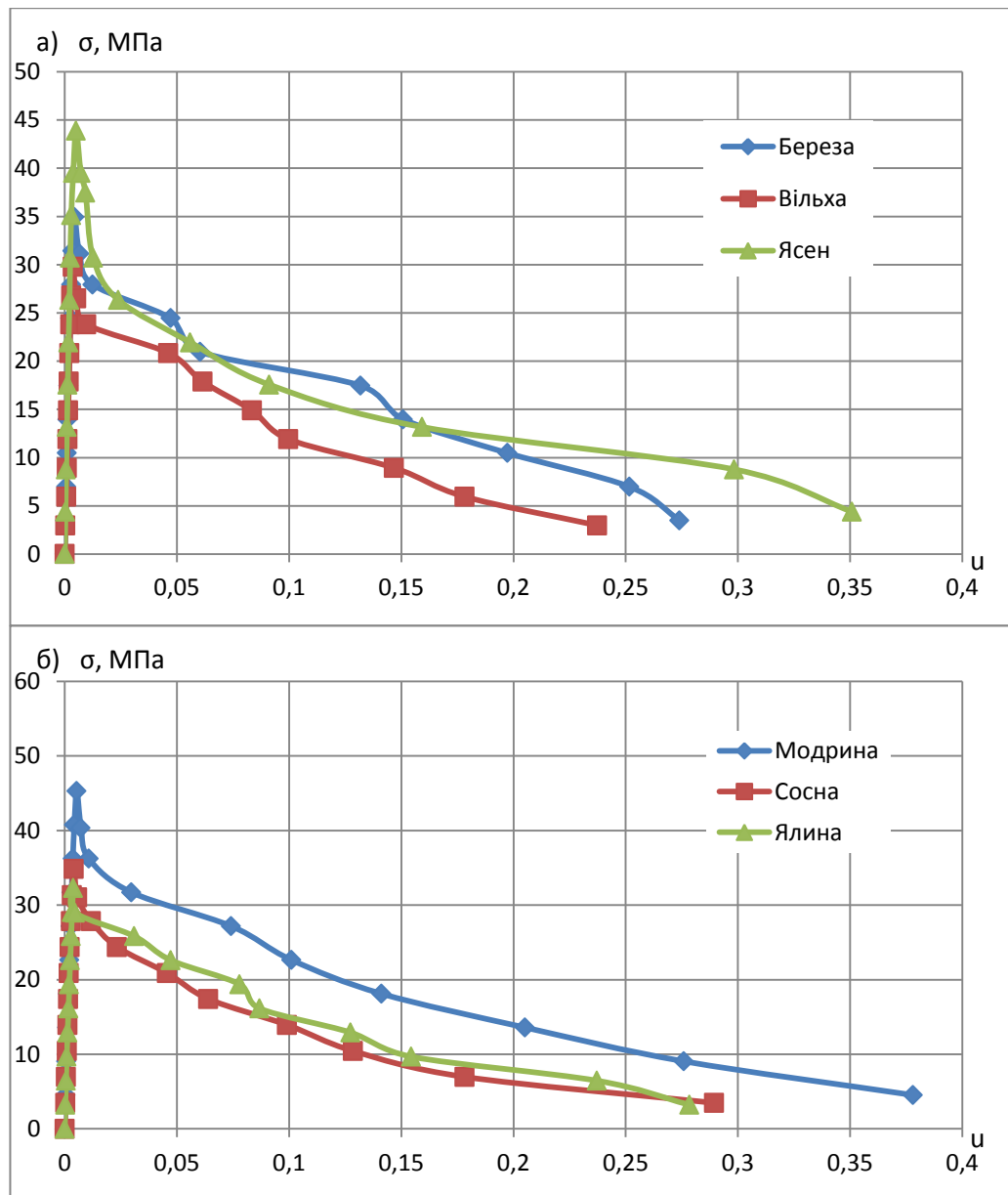


Рис.4.8. Дійсні (повні) діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » різних порід суцільної деревини у віці 20 років вологістю 12%:

а) листяних; б) хвойних

На другій ділянці діаграма досягає свого максимуму (найвища точка діаграми) та має такі міцнісні та деформівні показники:

- для листяних порід (рис.4.8а): максимальні напруження деревини берези стають меншими на 24,6% в порівнянні з призмами віком 40 років – $f_{c,0,d}=34,6$ МПа, а критичні деформації мають також тенденцію до зменшення на 15,4% – $u_{c,0,d,exp}=0,00441$; міцність зразків вільхи падають на 31,5% в тому ж діапазоні та мають відмітку $f_{c,0,d}=28,3$ МПа, критичні деформації стають значно меншими на 42,7% – $u_{c,0,d,exp}=0,00302$; призми ясена мають максимальні напруження $f_{c,0,d}=42,9$ МПа, що на 23,4% менші, деформівність падає на 18,5% – $u_{c,0,d,exp}=0,00504$;

- для хвойних порід (рис.4.8б): максимальні напруження деревини модрина були зафіксовані на позначці $f_{c,0,d}=44,1$ МПа та стали меншими на 27,2%, при цьому критичні деформації зменшуються на 17,2% – $u_{c,0,d,exp}=0,00534$; зразків сосни – на 20,4% ($f_{c,0,d}=35,8$ МПа), деформівність – на 16,6% ($u_{c,0,d,exp}=0,00409$); призм ялини максимальні напруження – на 19,6% ($f_{c,0,d}=33,6$ МПа), а критичні деформації – на 24,2% ($u_{c,0,d,exp}=0,00363$).

На даній ділянці максимальні напруження та критичні деформації стають меншими в порівнянні зі зразками 40 років: міцність на вершині діаграми падає в межах 19,6–31,5%, а деформівність – 15,4–42,7%.

Третю ділянку розглянемо в п.4.1.2.3.

На четвертій ділянці наведемо тільки остаточні деформації за напружень $\sigma_4=0,1f_{c,0,d}$, які вдалося зафіксувати, оскільки далі відбувалося руйнування зразків, а потім їх повне розвантаження. Були визначені наступні показники остаточних деформацій: деревини берези зменшились на 8,4% та досягли значення $u_{c,fin}=0,2740$; вільхи – на 13,7% ($u_{c,fin}=0,2373$); ясена – на 16,4% ; ($u_{c,fin}=0,3574$); модрина – на 15,2% ($u_{c,fin}=0,3781$); сосни – на 15,7 ($u_{c,fin}=0,2894$); ялини – на 10,2% ($u_{c,fin}=0,2784$).

4.1.2.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) віком 20 років

За результатами експериментальних досліджень призм із суцільної деревини хвойних та листяних порід віком 20 років за жорсткого режиму випробувань побудовані діаграми «модуль деформацій – рівень напружень» (рис.4.9а, рис.4.9б), на основі яких встановлені початкові модулі пружності всіх зразків та модулі деформацій.

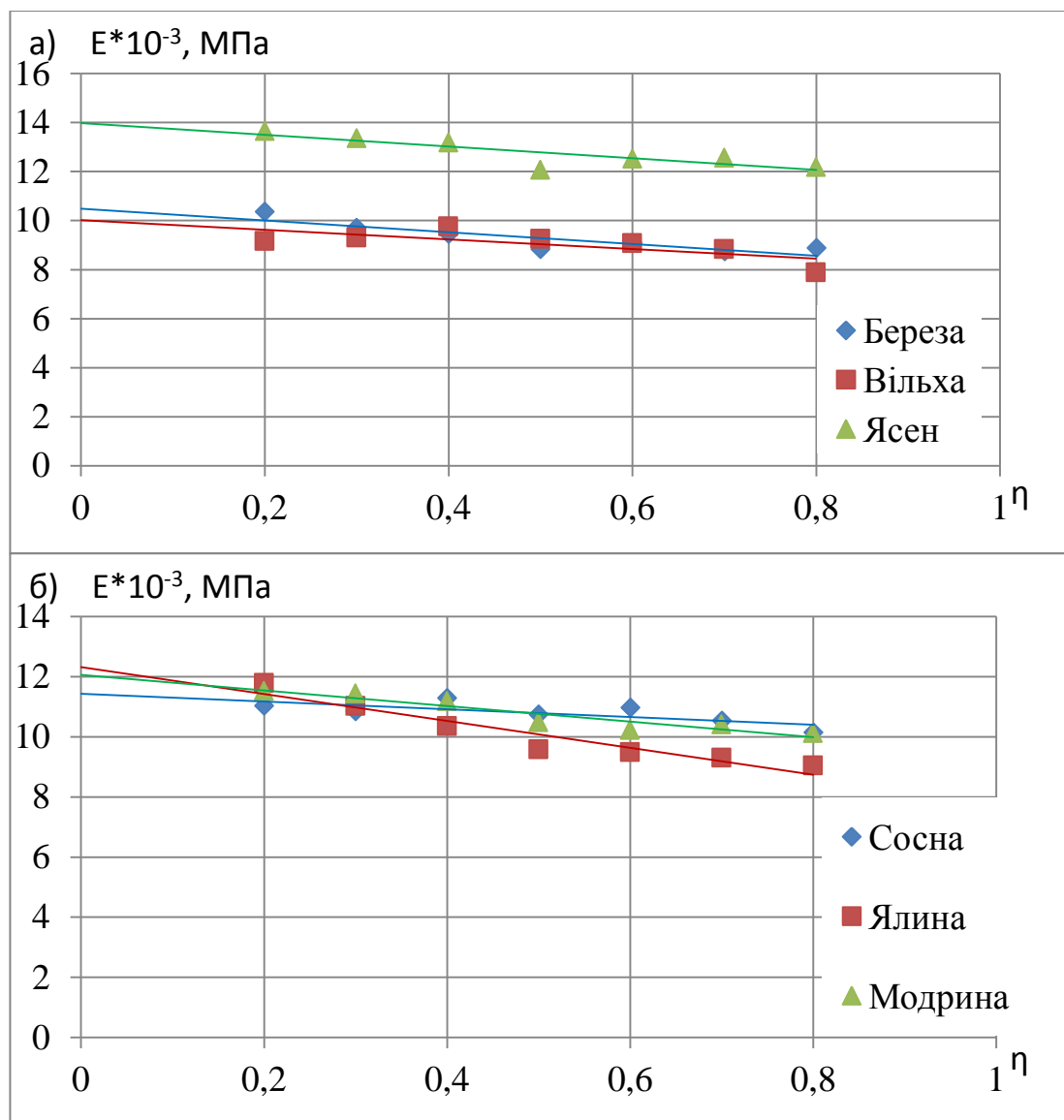


Рис.4.9. Діаграми « $E-\eta$ » (січний модуль – рівень напружень) різних порід суцільної деревини у віці 20 років за вологості 12%: а) листяних; б) хвойних

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії суцільної деревини у віці 20 років за вологості 12% приведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії суцільної деревини у віці 20 років за вологості 12%

Назва зразка	Кореляційне рівняння	r	m_r	r/m_r	$V, \%$
БС-12-20-1,5	$E' = 10,585 \cdot (1 - 0,034 \cdot \eta)$	0,772	0,153	5	1,93
ВС-12-20-1,5	$E' = 9,957 \cdot (1 - 0,106 \eta)$	0,786	0,145	5	4,81
ЯсС-12-20-1,5	$E' = 14,099 \cdot (1 - 0,055 \cdot \eta)$	0,987	0,010	101	0,62
СС-12-20-1,5	$E' = 11,432 \cdot (1 - 0,037 \cdot \eta)$	0,753	0,164	5	2,10
МС-12-20-1,5	$E' = 12,061 \cdot (1 - 0,057 \cdot \eta)$	0,939	0,044	21	0,62
ЯлС-12-20-1,5	$E' = 12,322 \cdot (1 - 0,139 \cdot \eta)$	0,954	0,034	28	1,78

З побудованих графіків визначаємо початкові модулі пружності всіх досліджуваних порід деревини віком 20 років: берези менше на 15,2% в порівнянні зі зразками віком 40 років ($E_0 = 10500$ МПа); вільхи – на 11,7% ($E_0 = 10000$ МПа); ясена – на 11,4% ($E_0 = 14000$ МПа); модрина – на 9,1% ($E_0 = 12100$ МПа); сосни – на 9,6% ($E_0 = 11400$ МПа); ялини – на 11,4% ($E_0 = 12300$ МПа).

Також встановлено зміну модуля деформацій (січного) на протязі від початку до рівня напружень $\eta = 0,8$ для всіх призм: берези падає на 23,5%; вільхи – на 20,5%; ясена – на 16,7%; модрина – на 12,1%; сосни – на 10,7%; ялини – на 39,8%.

4.1.2.3. Критичні деформації деревини віком 20 років

На основі експериментальних досліджень та повних діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c » суцільної деревини віком деревини 20 років $u_{c,0,d,exp}$ (рис.4.8а, рис.4.8б) визначаємо критичні деформації всіх зразків окремо для кожної породи. Усередненні значення критичних деформацій заносимо до табл.4.7.

Критичні деформації суцільної деревини листяних та хвойних порід віком 20 років $u_{c,0,d,th}$ знаходимо теоретичним шляхом за формулою (2.9) (табл.4.8). При цьому коефіцієнт складає $c_1 = 8,61 \cdot 10^{-7}$ (МПа)⁻² для листяних та хвойних порід віком 20 років.

Таблиця 4.8

Значення експериментальних та теоретичних показників усереднених критичних деформацій суцільної деревини віком 20 років

№п/п	Порода деревини	К-сть призм шт.	Переріз зразків, мм	$f_{c,0,d}$ МПа	E_0 , МПа	$u_{c,0,d,exp}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,0,d,th}$
1	Береза	6	30x30x120	34,6	10500	0,00441	0,00330	0,00103	0,00433
2	Вільха	6	30x30x120	28,2	10000	0,00302	0,00282	0,00068	0,00350
3	Ясен	6	30x30x120	42,9	14000	0,00504	0,00306	0,00158	0,00464
4	Модрина	6	30x30x120	44,1	12100	0,00534	0,00364	0,00167	0,00531
5	Сосна	6	30x30x120	35,8	11400	0,00409	0,00314	0,00110	0,00424
6	Ялина	6	30x30x120	33,6	12300	0,00363	0,00273	0,00097	0,00370

Таким чином значення критичних деформацій, визначених за формулою (2.9), зменшилися в порівнянні з тими ж показниками віком 40 років: берези в 1,18 раза; вільхи в 1,23 раза; ясена в 1,25 раза; модрини в 1,28 раза; сосни в 1,16 раза; ялини в 1,14 раза.

Також проведемо окремий аналіз пружної та пластичної складової критичних деформацій, оскільки формула (2.9) дозволяє нам це зробити.

Отже, пружна складова критичних деформацій понесла наступні зміни: для берези стала меншою в 1,09 рази; вільхи – в 1,13 рази; ясена – в 1,13 рази; модрина – в 1,17 рази; сосни – в 1,10 рази; ялини – в 1,07 рази.

А пластична складова в цілому зменшилася для всіх досліджуваних порід деревини: для берези – в 1,47 рази; вільхи – в 1,63 рази; ясена – в 1,49 рази; модрина – в 1,51 рази; сосни – в 1,35 рази; ялини – в 1,34 рази.

Для критичних деформацій, які визначені теоретичним шляхом, відбувається характерне зменшення значень віком 20 років в порівнянні з 40 років в інтервалі 14–28%. В той же час складові критичних деформацій функції (2.9) спадають, але по різному: пружна незначно до 17%, а пластична суттєво в межах 34–63%.

Проведемо статистичний аналіз отриманих експериментальних та теоретичних результатів досліджень за всіма 36-ма зразками хвойних та листяних порід суцільної деревини віком 20 років (рис.3.17), (табл.4.9).

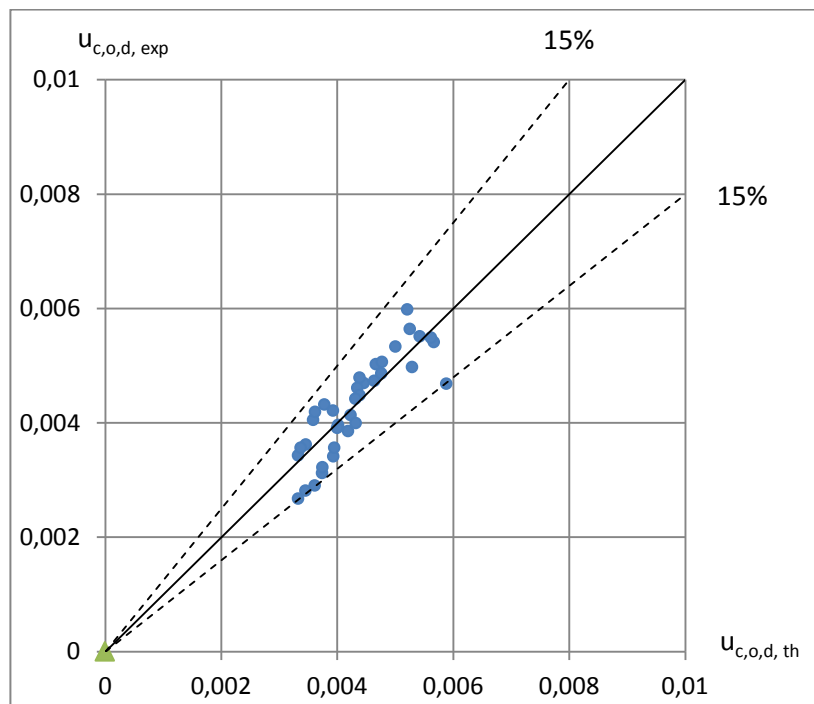


Рис.4.10. Відхилення експериментальних значень критичних деформацій від теоретичних за формулою автора (2.9) суцільної деревини листяних та хвойних порід віком 20 років

Статистична оцінка формули автора (2.9) з визначення критичних деформацій суцільної деревини листяних та хвойних порід віком 20 років

Формула для визначення критичних деформацій	Відхилення від експериментальних значень, %				
	$\Delta_{u,1}$	$\Delta_{u,2}$	Δ_u	σ_u	$\Delta_{u,max}$
$u_{c,0,d} = f_{c,0,d} / E_c + c_1 \cdot f_{c,0,d}^2$, де $c_1 = 8,61 \cdot 10^{-6} \text{ (МПа)}^{-2}$	-15,61	20,52	0,98	10,40	20,52
36 зразків. $\Delta_{u,1}$, $\Delta_{u,2}$ – нижня та верхня межі відхилень від експериментальних значень; Δ_u , σ_u – середньоарифметичні та стандартні значення цих відхилень; $\Delta_{u,max}$ – максимальне з $\Delta_{u,1}$ і $\Delta_{u,2}$.					

Отже, аналізуючи (рис.4.10) та табл.4.9. приходимо до висновку, що збіжність теоретичних та експериментальних значень критичних деформацій є задовільною незалежно від породи деревини. Максимальна розбіжність складає $\Delta_{u,max}=20,52\%$.

4.1.2.4. Граничні відносні деформації суцільної деревини за повздожнього стиску віком 20 років

Визначаємо граничні деформації листяних та хвойних порід деревини віком 20 років за стандартної вологості 12% згідно запропонованого алгоритму (рис.2.20). Для встановлення дійсних значень граничних деформацій за запропонованою методикою математичного моделювання необхідно визначити коефіцієнти поліному w_1, w_2, w_3, w_4 залежності (2.5), а також наводимо необхідні міцнісні та деформівні характеристики, які були знайдені в попередніх пунктах, зокрема $u_{t,0,d}$, $u_{c,0,d}$, E_0 .

Після встановлення коефіцієнтів поліному (2.5) та відповідних міцнісних та деформівних характеристик будуюмо діаграми «момент–кривина» всіх досліджуваних порід деревини віком 20 років (рис.4.11а, рис.4.11б).

Отримані графіки (рис.4.11а, рис.4.11б) трансформуємо в діаграми «момент–деформації» (рис.4.12а, рис.4.12б) та встановлюємо значення граничних деформацій віком 20 років (табл.4.10).

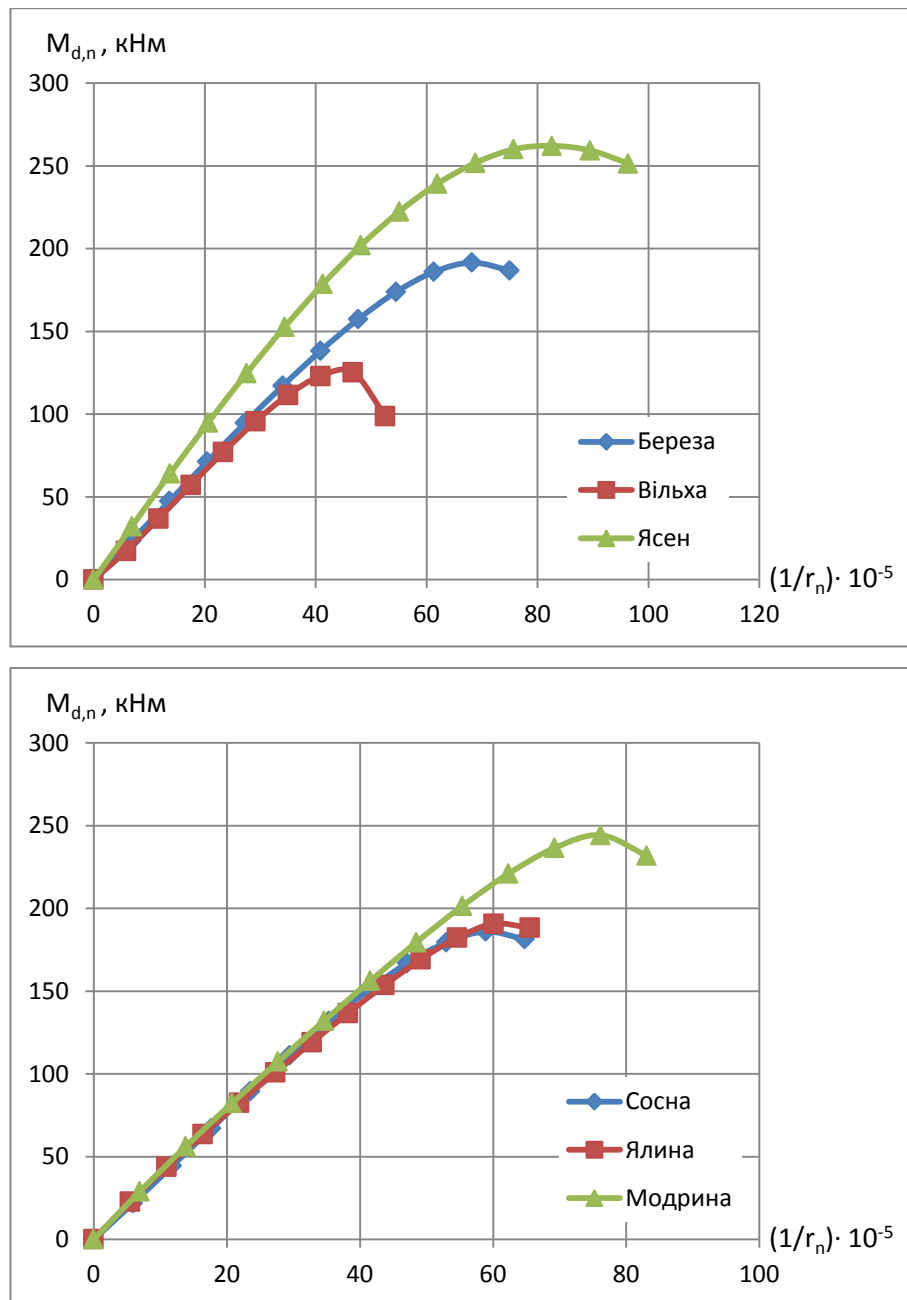


Рис.4.11. Діаграми «момент–кривина» віком 20 років відповідно:

а) листяних порід; б) хвойних порід

Отже, граничні деформації призм віком 20 років (III ділянка, спадна вітка діаграми), в закритичній стадії роботи, мають наступні показники: для деревини берези в порівнянні зі значеннями віку 40 років зменшилися на 12,7% і становлять $u_{c,u}=0,00670$; вільхи – на 31,7% та досягли позначки $u_{c,u}=0,00457$; ясена – на 14,4% – $u_{c,u}=0,856$; модрина зменшилися на 16,8% – $u_{c,u}=0,0751$; сосни зменшилися на 16,9% – $u_{c,u}=0,00570$; ялини – на 9,9% – $u_{c,u}=0,00601$.

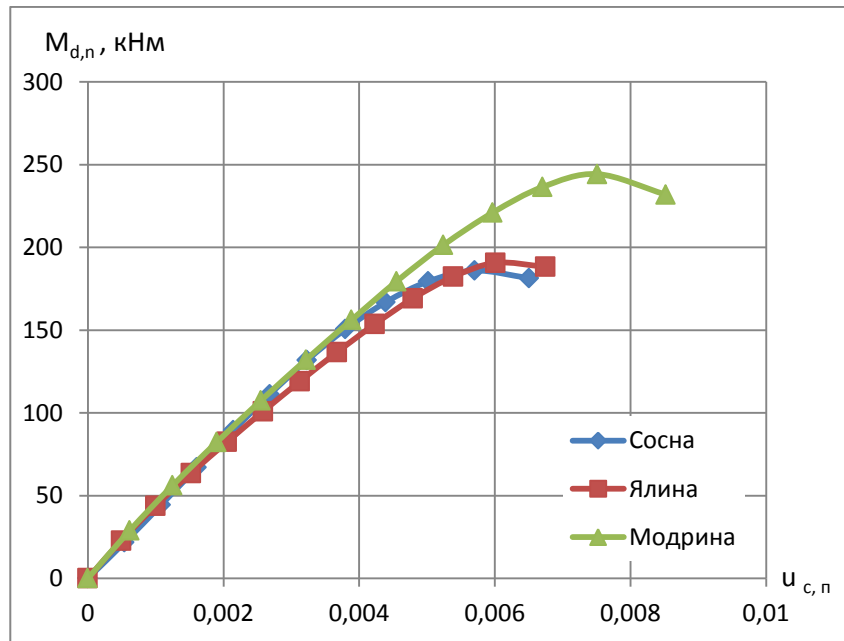
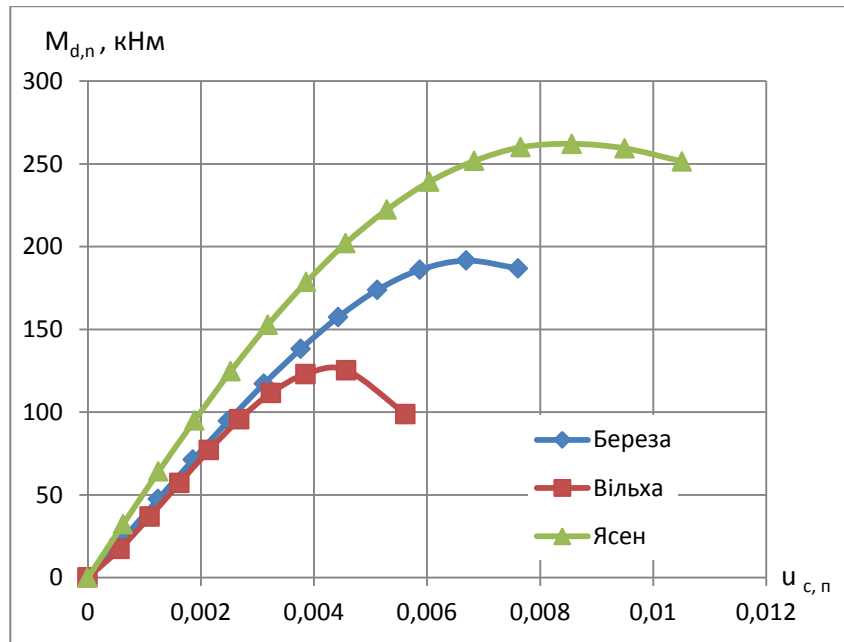


Рис.4.12. Діаграми «момент–деформації» віком 20 років відповідно:

а) листяних порід; б) хвойних порід

До визначення усереднених граничних деформацій суцільної деревини
віком 20 років

Породи деревини	Коефіцієнти поліному (3.5)				$u_{c,0,d}$	$u_{t,0,d}$	E_0 , МПа	$u_{c,u}$
	w_1	w_2	w_3	w_4				
Береза	9538	3088	-5012	304	0,00441	0,00786	10500	0,00670
Вільха	6172	12391	-11995	1506	0,00302	0,00749	10000	0,00457
Ясен	13671	-413	-6424	1876	0,00504	0,00735	14000	0,00856
Модрина	-7682	14465	-11717	13413	0,00534	0,00712	12100	0,00751
Сосна	9944	5510	-7352	409	0,00409	0,00651	11400	0,00570
Ялина	13303	-12813	13633	-5756	0,00363	0,00597	12300	0,00601

Для всіх порід деревини спостерігається зменшення граничних деформацій в межах 10–32% в порівнянні зі зразками віком 40 років.

Важливим чинником для подальших розрахунків елементів та конструкцій з деревини є визначення співвідношень граничних деформацій до критичних (експериментальні значення):

- для деревини берези $u_{c,u}=1,52u_{c,0,d}$;
- вільхи $u_{c,u}=1,51u_{c,0,d}$;
- ясена - $u_{c,u}=1,70u_{c,0,d}$;
- модрина - $u_{c,u}=1,41u_{c,0,d}$;
- сосни - $u_{c,u}=1,39u_{c,0,d}$;
- ялини - $u_{c,u}=1,66u_{c,0,d}$.

4.1.2.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c »

Перевіряємо адекватність залежності (2.5) для всіх зразків віком 20 років через апроксимацію діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c », як для повних діаграм деформування, так і з обмеженням в точці граничних

деформацій. Для цього визначимо всі коефіцієнти поліному w_1, w_2, w_3, w_4 : для діаграми з обмеженням в точці граничних деформацій наведені в табл. 4.11, а для повної - наведені в табл. 4.12.

Таблиця 4.11

Результати апроксимації діаграм листяних та хвойних порід деревини віком 20 років з обмеженням в точці граничних деформацій

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (2.5) та дослідних значень η
	w_1	w_2	w_3	w_4	
Береза	9388,56	4174,71	-7255,21	1609,61	0,999
Вільха	6239,39	11950,76	-11146,20	1030,02	0,999
Ясен	13631,96	-82,99	-7189,71	2350,80	0,999
Модрина	13124,44	-9552,03	9984,83	-5077,50	0,999
Сосна	9687,65	7404,57	-11324,73	2743,21	0,999
Ялина	13284,35	-12675,02	13357,86	5599,20	0,999

Таблиця 4.12

Результати апроксимації повних діаграм листяних та хвойних порід деревини віком 20 років

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (2.5) та дослідних значень η
	w_1	w_2	w_3	w_4	
Береза	11729,16	-3984,24	175,25	-1,84	0,974
Вільха	11068,51	-3153,53	157,20	-1,72	0,987
Ясен	15250,20	-7135,17	602,52	-7,23	0,982
Модрина	11929,36	-3641,24	200,15	-2,13	0,982
Сосна	9496,09	-1011,00	31,07	-0,26	0,975
Ялина	10526,18	-2260,36	103,08	-1,02	0,995

Діаграми деревини з обмеженням в точці граничних деформацій побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) віком 20 років для деревини вільхи наведені на рис.4.13а, а для деревини сосни на рис.4.13б; повних – ясена (рис.4.14а), ялини (рис.4.14б).

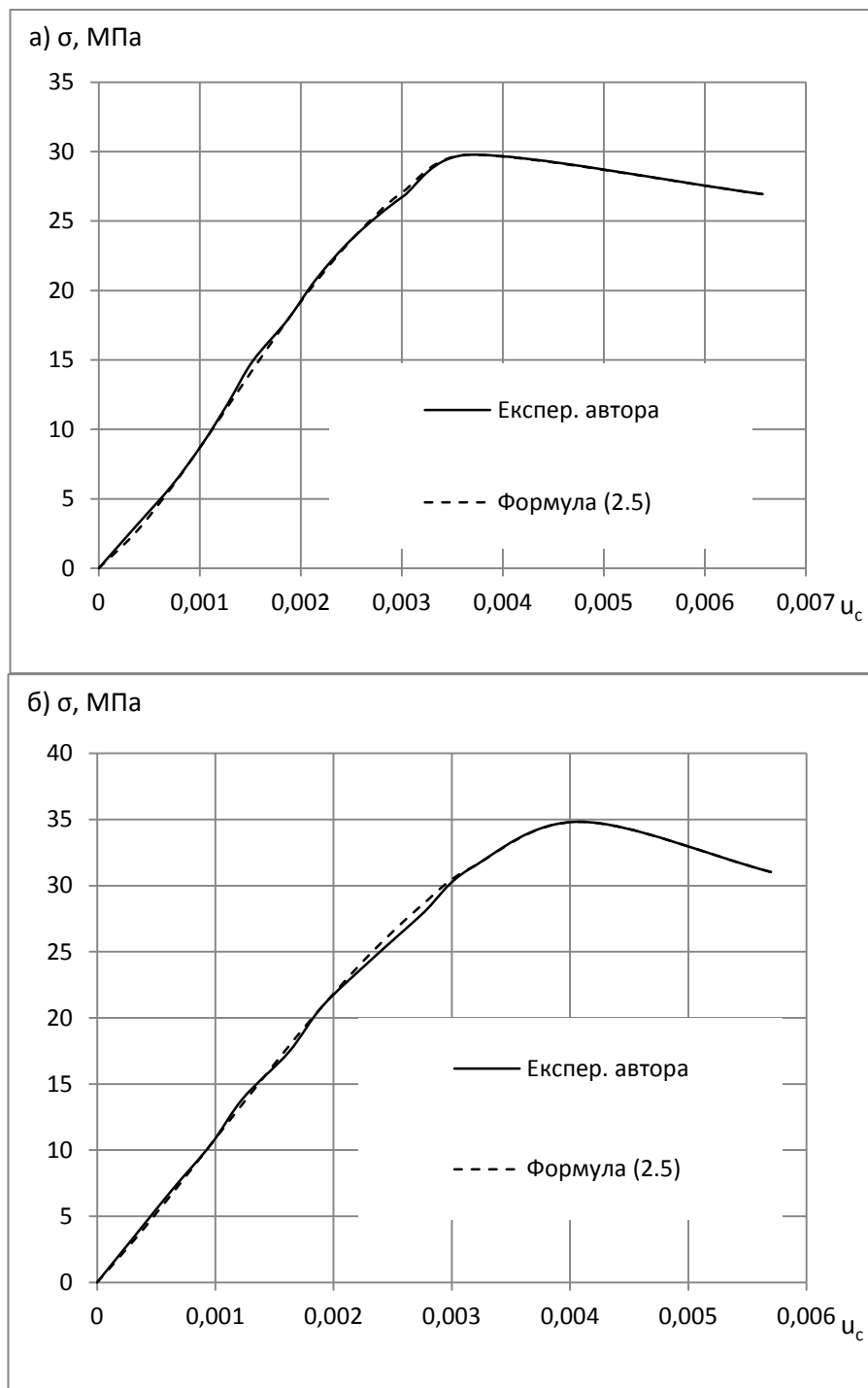


Рис.4.13. Діаграми деревини з обмеженням в точці граничних деформацій побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) віком 20 років: а) вільхи; б) сосни

Для інших порід деревини носить подібний характер.

Збіжність результатів є дуже високою та в більшій мірі прямує до 1 (табл.4.11).

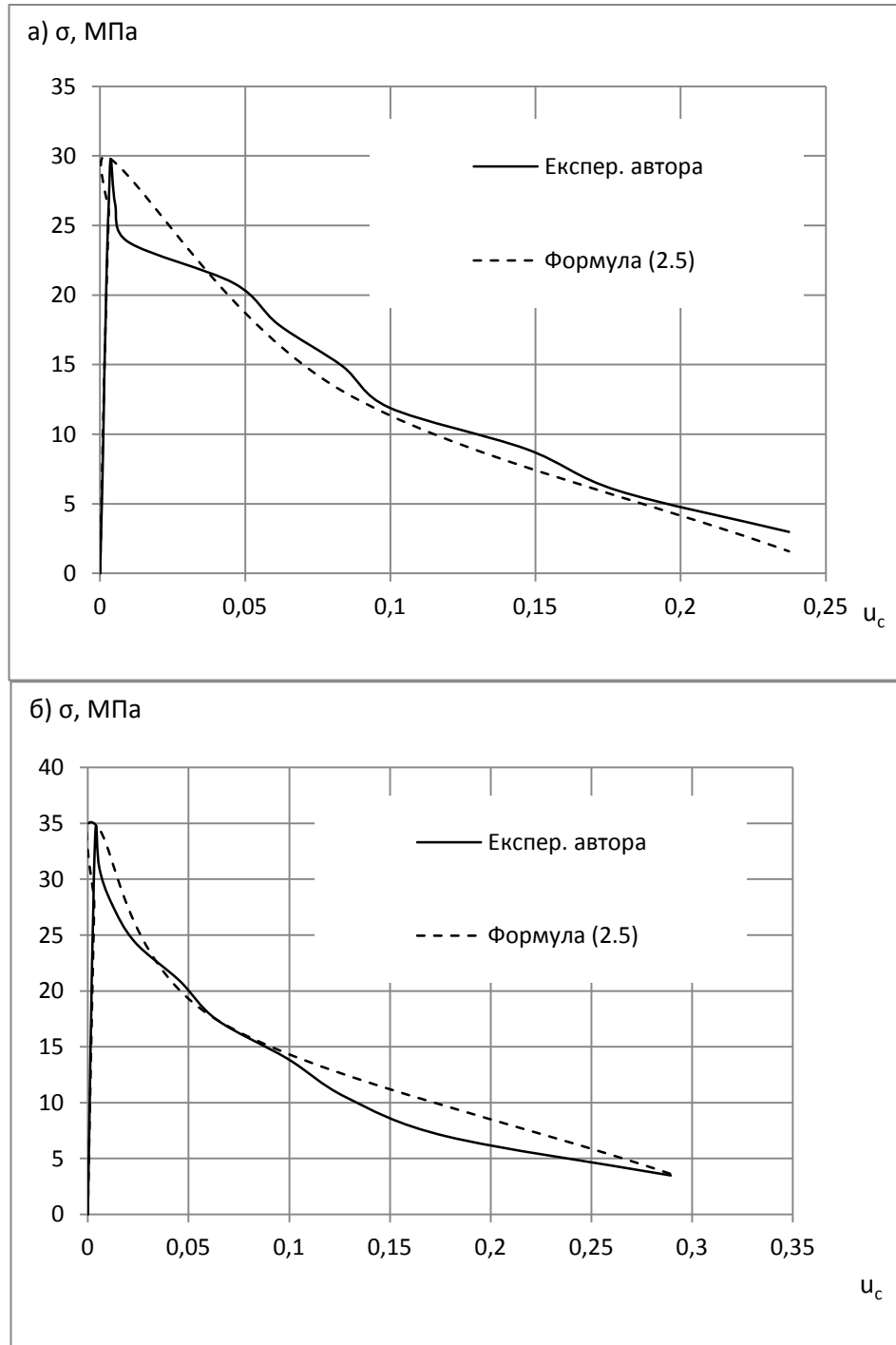


Рис.4.14. Дійсні (повні) діаграми деревини з обмеженням в точці граничних деформацій побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) віком 20 років: а) вільхи; б) сосни

Збіжність даних результатів віком 20 років є також досить високою та знаходиться в межах $\eta=0,974\dots0,995$ (табл.4.12)

Отже, функція (2.5) в повній мірі підходить для апроксимації, як повних діаграм деформування зразків конструкційних розмірів, так і з обмеженням в точці граничних деформацій віком 20 років.

4.2. Взаємозв'язок фактора віку з основними міцнісними та деформівними параметрами діаграми «напруження σ_c – деформації u_c »

Вітчизняні та закордонні вчені дослідженням міцнісних та деформівних характеристик суцільної деревини різного віку приділяли досить невелику увагу. В літературі фактично відсутні такі дослідження. Тому важливо надати інформацію наших власних досліджень основних параметрів діаграми «напруження σ_c – деформації u_c », яка б дозволяла враховувати при проектуванні конструкційних матеріалів, деталей, виробів, елементів, конструкцій з деревини з врахуванням фактору віку не тільки за 20, 40 та 60 років, але й проміжних.

Таким чином, на основі проведених експериментальних досліджень встановлюємо залежність міцності призм з відповідними показниками віку листяних (рис.4.15а) та хвойних (рис.4.15б) порід, при цьому встановлюючи максимальні напруження всіх досліджуваних порід деревини в межах 20–60 років через 5 років (додаток Г7).

Також важливим чинником для аналізу є зміна початкового модуля пружності (рис.4.16а, рис.4.16б), для якого аналогічним чином наводимо значення через 5 років (додаток Г8).

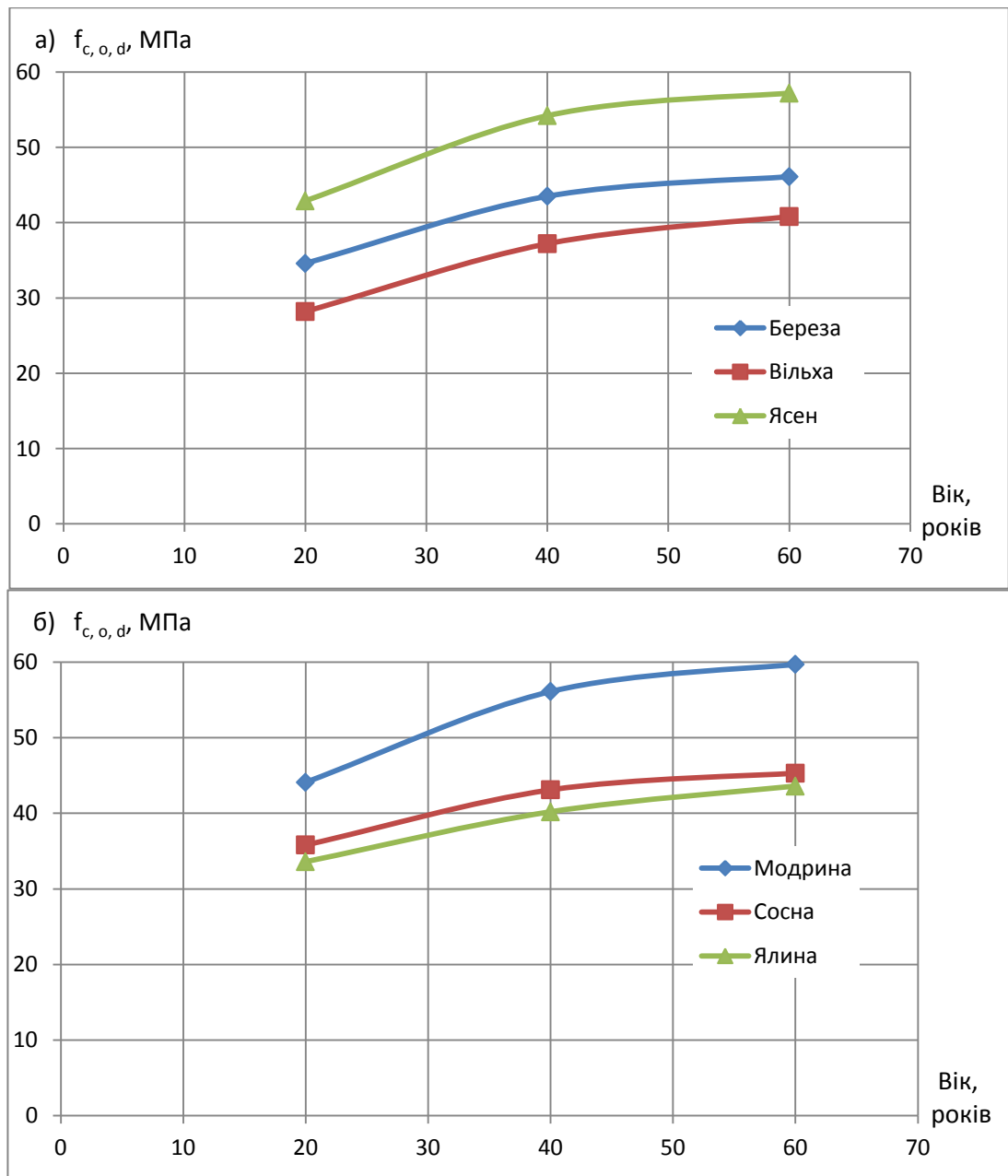


Рис.4.15. Залежність максимального напруження суцільної деревини від їх віку: а) листяних порід; б) хвойних порід

Також побудовано графік залежності усереднених критичних деформацій деревини за середніми значеннями на основі проведених експериментальних досліджень та визначених за функцією (2.9) від віку (рис.4.17а, рис.4.17б).

Для встановлення більшої точності наших досліджень критичні деформації в даному випадку приймалися середніми між експериментальними та теоретичними значеннями (додаток Г9). Пружна та пластична складові

критичних деформацій віком від 60 до 20 років через кожні 5 років наведено в додатках Г10 та Г11.

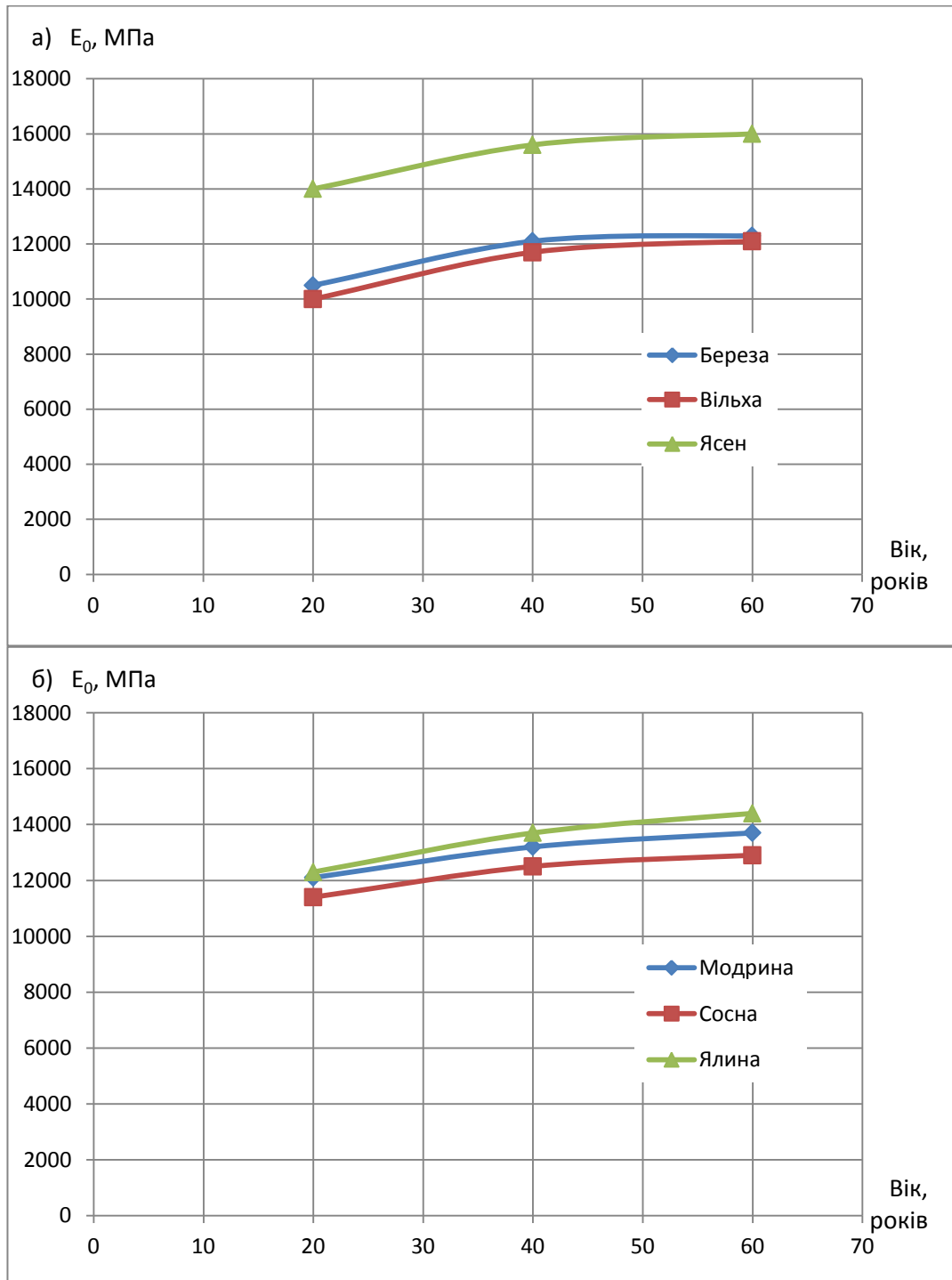


Рис.4.16. Залежність початкового модуля пружності суцільної деревини від їх віку: а) листяних порід; б) хвойних порід

Також встановимо залежність між граничними деформаціями та віком (рис.4.18а, рис.4.18б). Оскільки граничні деформації ми встановлювали, моделюючи роботу дерев'яного згинального елемента, то даний графік представляє для нас ще більший інтерес.

На основі рис.4.18а, рис.4.18б були визначені граничні деформації через кожних 5 років (додаток Г12).

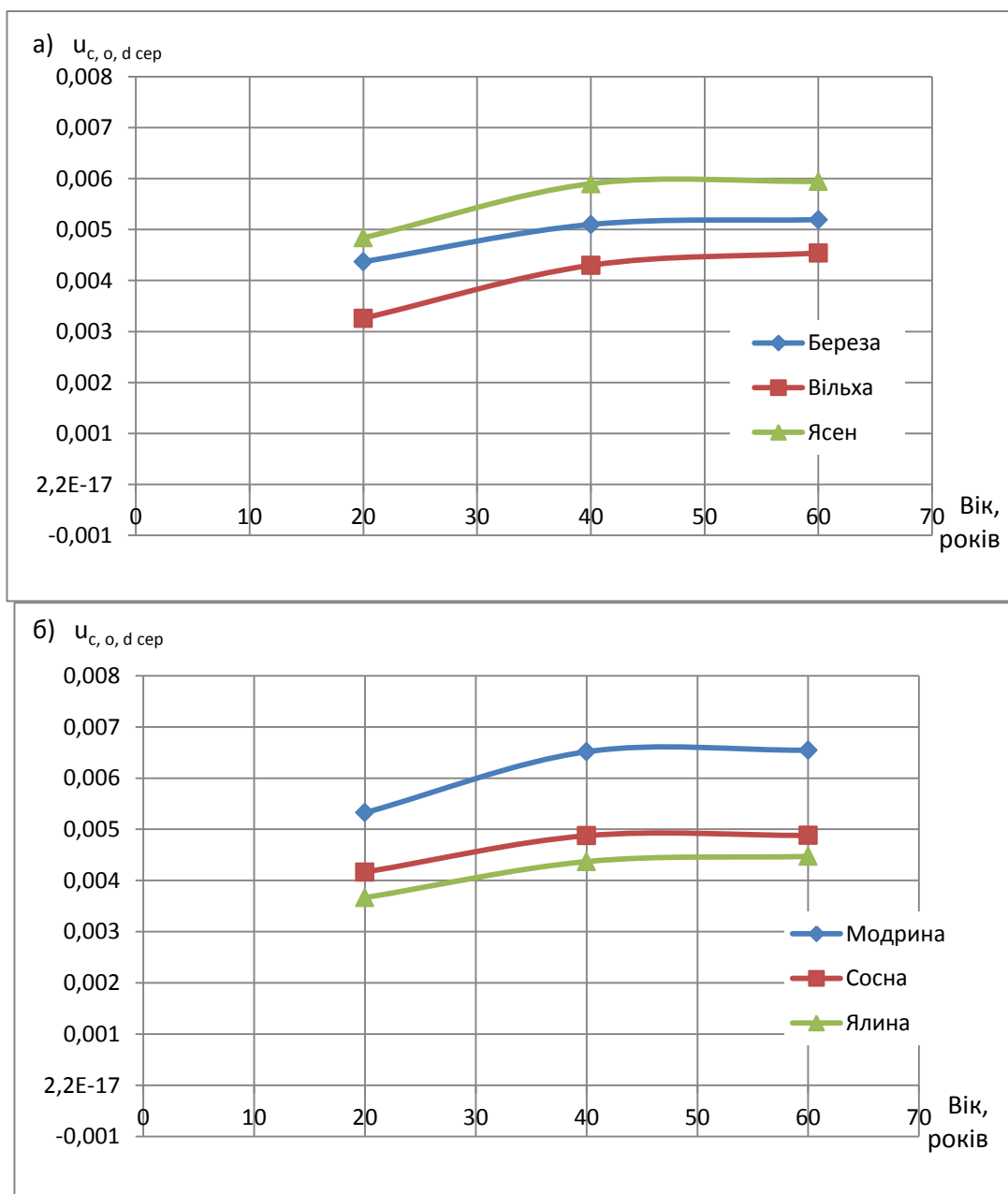


Рис.4.17. Залежність усереднених критичних деформацій (між експериментальними та теоретичними) суцільної деревини від їх віку:

а) листяних порід; б) хвойних порід

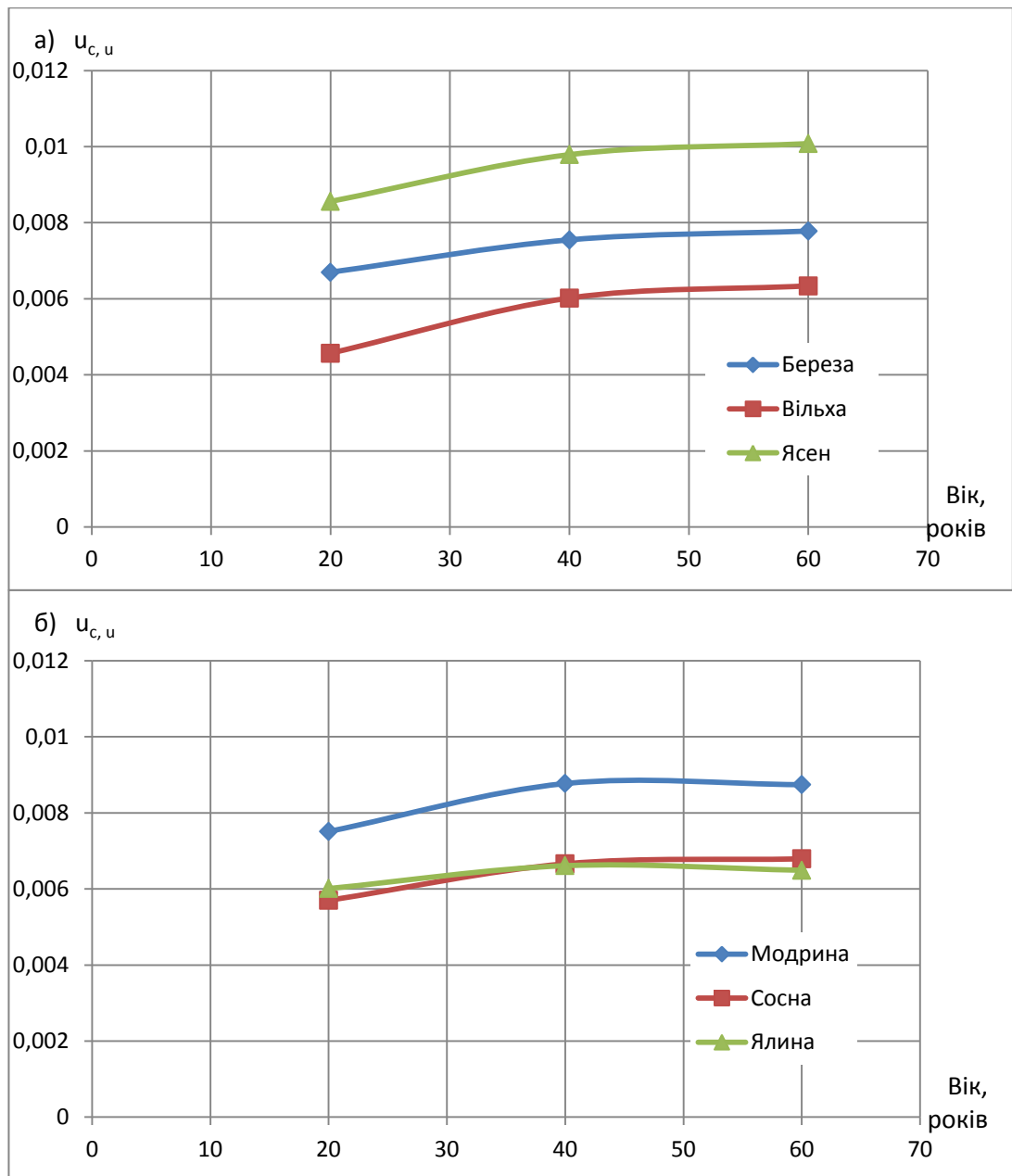


Рис.4.18. Залежність граничних деформацій суцільної деревини від їх віку:

а) листяних порід; б) хвойних порід

4.3. Динаміка зміни основних міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини від її віку

Для більш глибокого аналізу отриманих результатів побудуємо гістограми для кожного важливого параметру діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » та тих показників, які ми отримали теоретичним шляхом.

Отже, за результатами експерименту наведемо гістограму зміни усереднених максимальних напружень відповідно за віку 60, 40, 20 років для всіх досліджуваних порід деревини (рис.4.19).

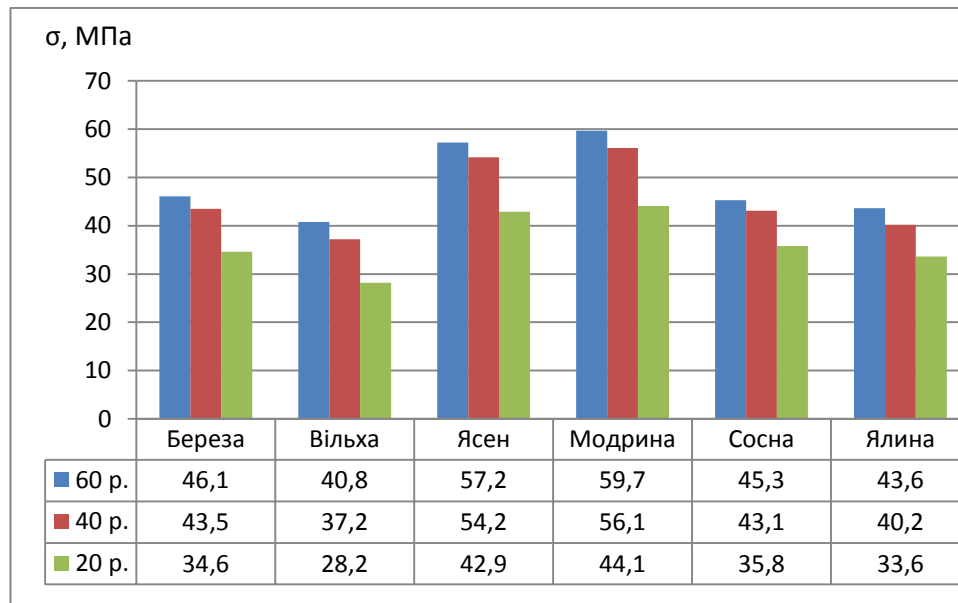


Рис.4.19. Динаміка зміни міцності листяних та хвойних порід деревини за різного показника віку

Проводячи аналіз рис.4.19, приходимо до висновку, що максимальні напруження деревини незначно зменшуються від 60 до 40 років та суттєво від 40 до 20 років. Отже, міцність спадає в інтервалі від 60 до 20 років: для зразків берези на 32,3%; вільхи – на 44,7%; ясена – на 30,3%; модрини – на 35,4%; сосни – на 26,5%; ялини – на 29,8%.

Також наведемо гістограму динаміки зміни початкового модуля пружності (рис.4.20). Даний показник також стає меншим в інтервалі від 60 до 20 років: для призм берези – на 17,1%; вільхи – на 12,1%; ясена – на 14,3%; модрини – на 13,2%; сосни – на 13,1%; ялини – на 17,0%.

Гістограма зміни критичних деформацій листяних та хвойних порід, які визначені експериментальним шляхом, наведені на рис. 4.21. Таким чином для даної характеристики також спостерігалось зменшення, зокрема, для деревини

берези на 19,1%, вільхи на 49,0 %, ясена на 21,0%, модрина на 19,8%, сосни на 20,1%, ялини на 28,7%.

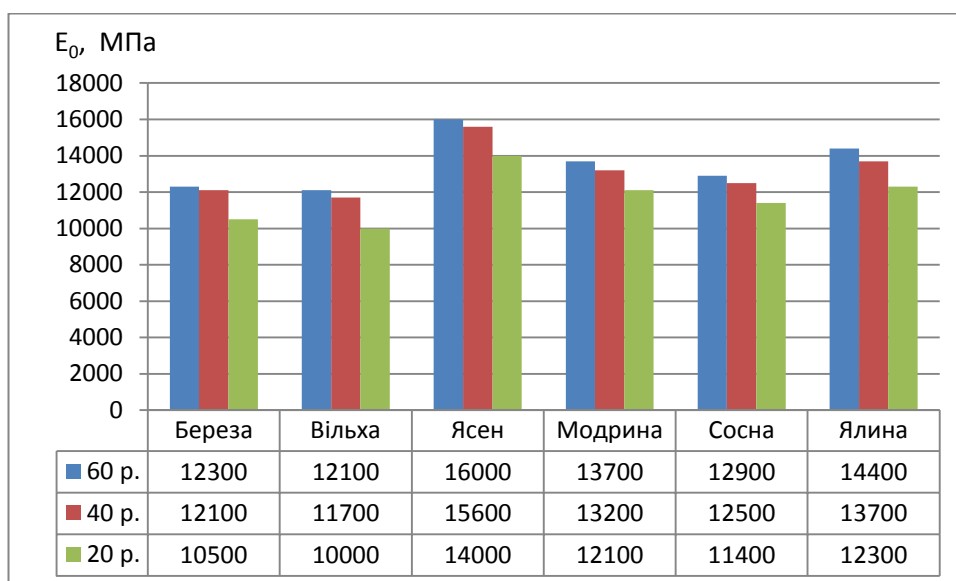


Рис.4.20. Динаміка зміни початкового модуля пружності листяних та хвойних порід деревини за різного показника віку

Зміна значень граничних деформацій також відбувається з поступовим їх зменшенням в інтервалі 60–20 років (рис.4.22): зразків берези на 16,1%, вільхи на 38,7%, ясена на 17,8%, модрина на 16,4%, сосни на 19,2%, ялини на 8%.

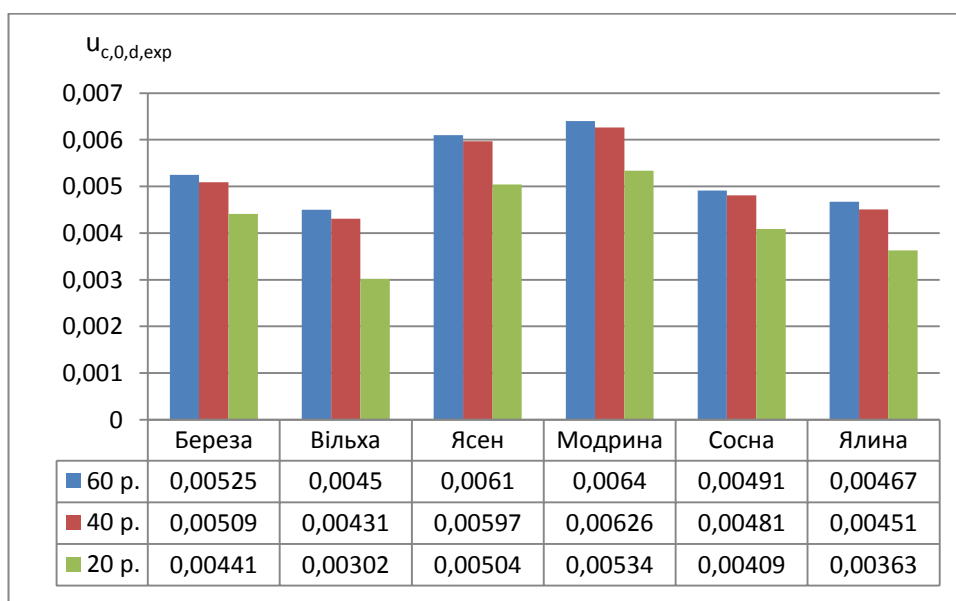


Рис.4.21. Динаміка зміни критичних деформацій листяних та хвойних порід деревини за різного показника віку визначених експериментальним шляхом

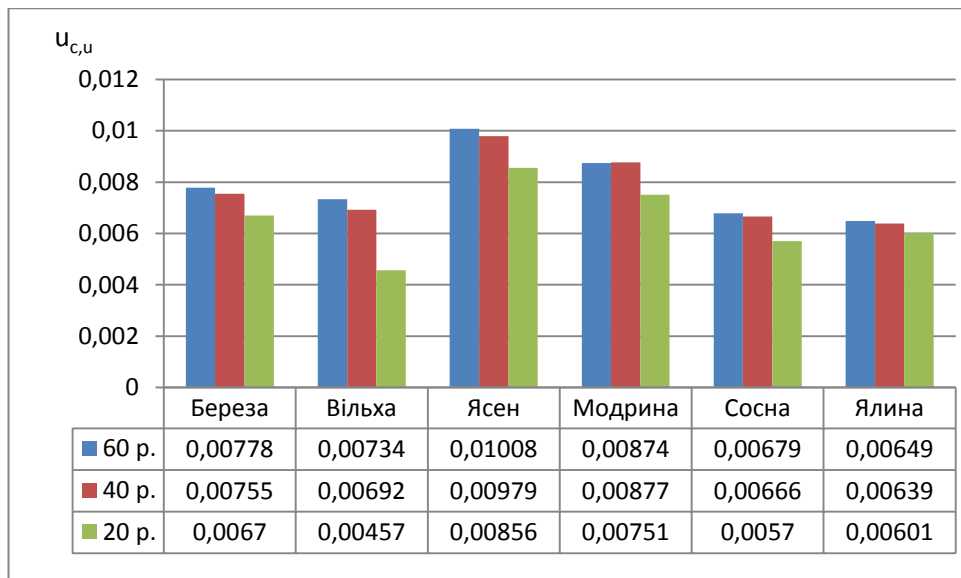


Рис.4.22. Динаміка зміни граничних деформацій листяних та хвойних порід деревини за різного показника віку

Динаміка зміни інших показників наведено в додатках Б4-Б6.

Діаграми деформування « σ_c - u_c » деревини хвойних та листяних порід з обмеженням в точці граничних деформацій різного віку наведено в додатках В1 та В2.

Аналізуючи всі основні міцнісні та деформівні характеристики діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » приходимо до висновку, що зі зменшенням віку вони також стають значно меншими.

4.4. Висновки до четвертого розділу

1. Вперше проведено широкомасштабні цілеспрямовані конструктивні експериментально-теоретичні дослідження впливу віку на міцнісні та деформівні характеристики суцільної деревини листяних (берези, вільхи, ясеня) та хвойних (модрина, сосни, ялини) порід на стиск вздовж волокон за жорсткого прикладання навантаження та побудовані повні діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » від початку завантаження і до руйнування (висхідна та спадна вітки).

2. Встановлено функцію полінома 4-го степеня для апроксимації повних діаграм деформування суцільної деревини за різного віку.

3. Встановлено залежності віку з основними міцнісними та деформівними параметрами діаграми «напруження σ_c – деформації u_c », зокрема міцності, початкового модуля пружності, критичних та граничних деформацій.

4. Основні міцнісні та деформівні параметри діаграми деформування незначно зменшуються від 60 до 40 років та суттєво від 40 до 20 років.

5. Міцність деревини в інтервалі від 60 до 20 років зменшується: для зразків берези на 32%; вільхи – на 45%; ясена – на 30%; модрина – на 35%; сосни – на 27%; ялини – на 30%, як і початковий модуль пружності: для призм берези – на 17%; вільхи – на 12%; ясена – на 14%; модрина – на 13%; сосни – на 13%; ялини – на 17%.

5. Критичні відносні деформації листяних та хвойних порід, які визначені експериментальним шляхом зі зменшенням віку деревини від 60 до 20 років зменшуються, зокрема, для деревини берези на 19%, вільхи на 49 %, ясена на 21%, модрина на 20%, сосни на 20%, ялини на 29%. Граничні деформації також поступово зменшуються: зразків берези на 16%, вільхи на 39%, ясена на 18%, модрина на 16%, сосни на 19%, ялини на 8%.

6. Проведено детальний статистичний аналіз експериментально-теоретичних досліджень.

Матеріали розділу 4 наведені в наступних працях [40, 41, 44-46 53-55, 57, 58, 60, 67, 68, 273, 275, 276, 337]

РОЗДІЛ 5

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ СУЦІЛЬНОЇ ДЕРЕВИНИ

5.1. Клеєна деревина (II серія випробувань)

Були проведено експериментальні дослідження роботи клейових з'єднань деревини на сколювання вздовж волокон за м'якого режиму прикладання навантаження та зразків клеєної деревини конструкційних розмірів перерізом 30x30x120 мм всіх наявних листяних та хвойних порід за жорсткого режиму.

Методика виготовлення зразків та опис процесу склеювання описано в розділі 2.

Аналіз досліджень будемо проводити в порівнянні з призмами суцільної деревини за стандартної вологості 12% віком 60 років.

5.1.1. Дослідження роботи клейових з'єднань деревини за сколювання вздовж волокон

Насамперед паралельно з експериментальними випробуваннями композиційних матеріалів на основі суцільної та клеєної деревини були проведені дослідження роботи клейових швів на сколювання вздовж волокон на зразках (рис.5.1), які були виготовлені згідно чинних стандартів згідно [79]. Випробування клейових з'єднань з клеєної деревини на сколювання вздовж волокон (рис. 5.2) проводилось на зразках виготовлених з деревини першого сорту вологістю 12% з дотриманням державних стандартів [96].

Зразки клейових швів були вирізані з країв дощатоклеєних балочок-заготовок. При виборці зразків для випробування зверталася увага на товщину клейового шва, яка не повинна перевищувати 0,5 мм, та його якість. Так як, деревина є анізотропним матеріалом, то при випробуваннях клейових з'єднань

зверталась увага на розташування волокон в обох деталях, що прилягали до клейового шва аби вони були паралельні цьому шву.

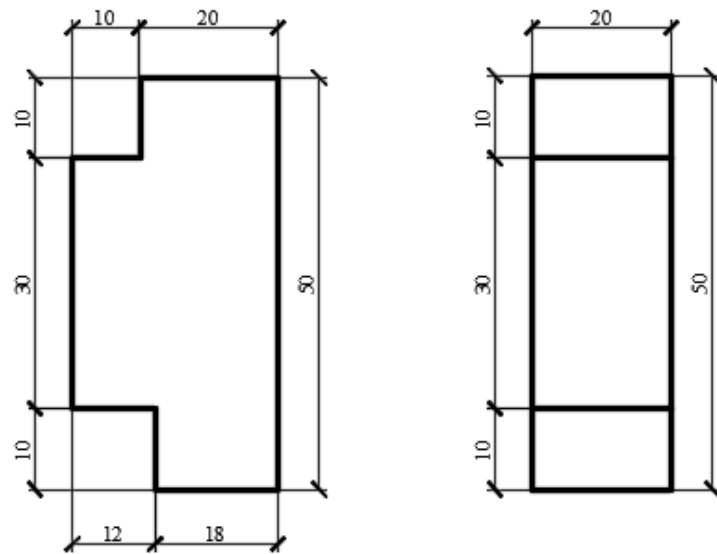


Рис.5.1. Геометричні розміри дослідного зразка за випробування на сколювання клейових швів уздовж волокон

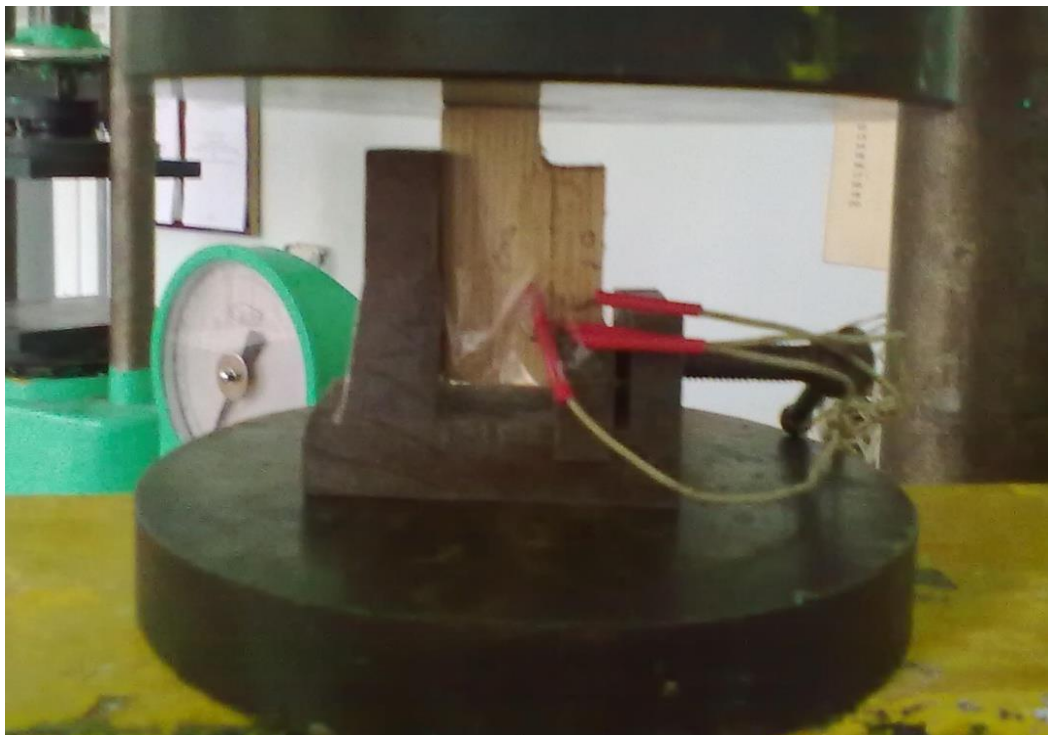


Рис. 5.2. Випробування дослідного зразка КЗ на сколювання клейових швів
вздовж волокон

За одноразової дії короткочасного навантаження були випробувані двадцять один дослідний зразок-близнюк КЗ-1...КЗ-21. Навантаження до зразка прикладалося ступенями з 3-х хвилинною витримкою для зняття показів. Випробування проводилося за м'якого режиму.

Межу міцності клейового шва в з'єднанні деревини при сколюванні визначаємо за формулою

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad (5.1)$$

де P – руйнівне зусилля, Н;

A – площа клеєного з'єднання, м^2 .

Середнє значення несучої здатності зразків марки КЗ на сколювання з клеєної деревини склало 3,60 кН (табл. 5.1).

Руйнування всіх зразків з клейовими з'єднаннями за дії одноразових навантажень проходило по деревині поряд клейового шва. Це дає можливість зробити висновок, що обраний резорциновий клей для склеювання соснових дощок в пакет можна використовувати для склеювання при виготовленні дерев'яних з'єднань конструкцій, оскільки клейовий шов завжди має бути міцнішим за деревину.

Середнє значення межі міцності клейових з'єднань на зсув вздовж волокон за одноразового навантаження становить 6,00 МПа, що більше мінімальних значень наведених в нормативній літературі [97] .

5.1.2. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c »

На основі проведених експериментальних досліджень зразків клеєної деревини хвойних та листяних порід побудовані дійсні (повні) діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » (рис.5.3а, рис.5.3б) та визначені основні міцнісні та деформівні параметри на всіх розглянутих ділянках.

Значення граничних напружень при руйнуванні за дії одноразового навантаження при повздовжньому сколюванні

№ зразка	Несуча здатність, кН	Межа міцності, МПа	Характер руйнування
КЗ -1	2,95	4,92	По деревині
КЗ -2	3,72	6,20	
КЗ -3	2,90	4,83	
КЗ -4	3,95	6,59	
КЗ -5	2,55	4,25	
КЗ -6	3,85	6,42	
КЗ -7	4,35	7,25	
КЗ -8	4,25	7,08	
КЗ -9	3,12	5,20	
КЗ -10	4,15	6,92	
КЗ -11	3,25	5,42	
КЗ -12	4,30	7,17	
КЗ -13	3,20	5,33	
КЗ -14	3,30	5,50	
КЗ-15	3,69	6,15	
КЗ -16	3,40	5,67	
КЗ -17	3,95	6,58	
КЗ -18	2,95	4,92	
КЗ -19	5,10	8,50	
КЗ -20	3,60	6,00	
КЗ -21	3,10	5,17	
Середнє значення	3.60	6.00	По деревині

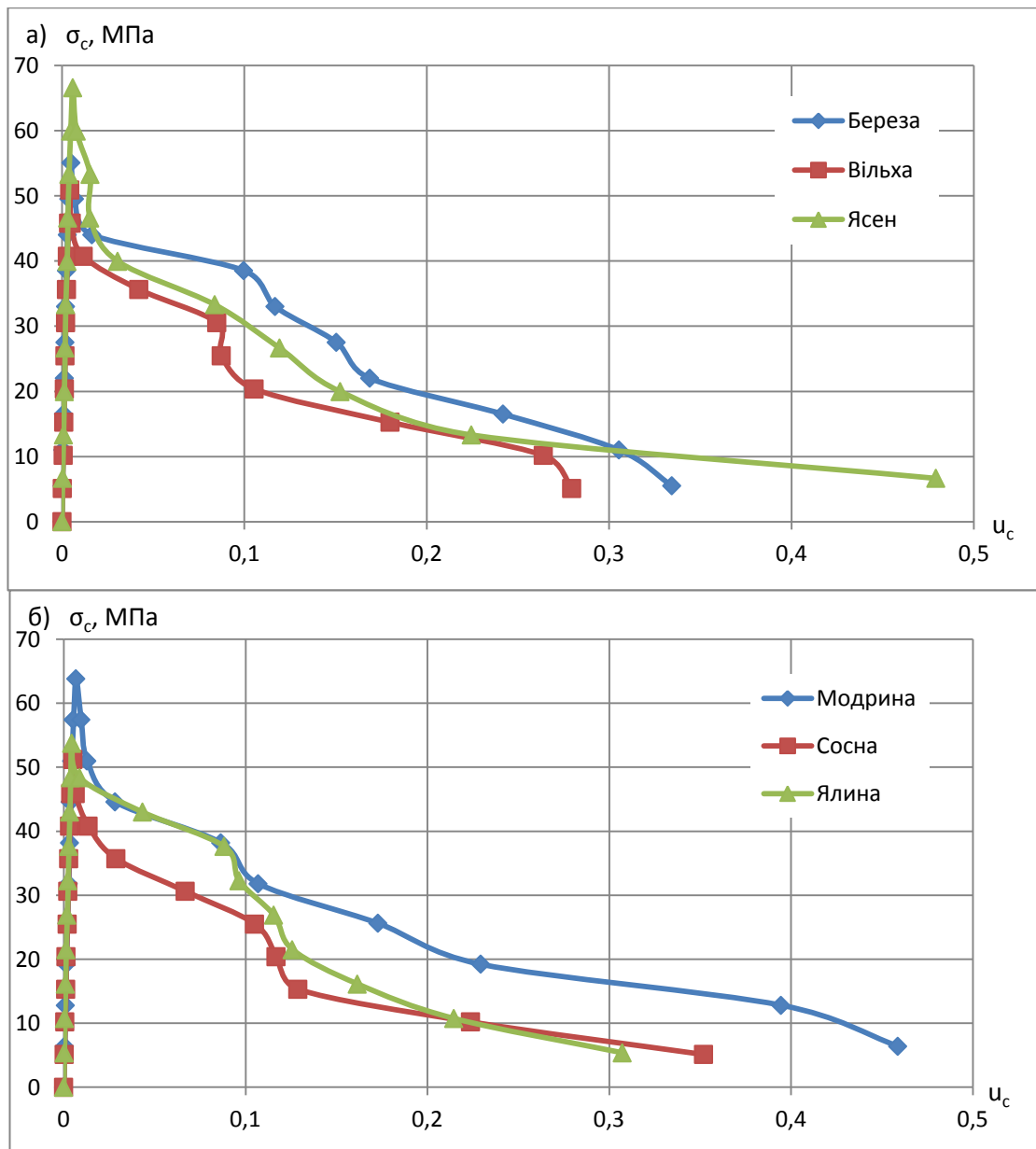


Рис.5.3. Дійсні (повні) діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » клеєної деревини різних порід: а) листяних; б) хвойних

На I ділянці за результатами випробувань були отримані наступні показники несуттєвого збільшення міцності: деревини берези $\sigma_{cI} = 9,0$ МПа; вільхи $\sigma_{cI} = 7,2$ Мпа; ясена $\sigma_{cI} = 9,1$ МПа; модрини $\sigma_{cI} = 9,6$ МПа; сосни $\sigma_{cI} = 8,1$ МПа; ялини $\sigma_{cI} = 7,4$ МПа. Отже, напруження на кінець першої ділянки максимально зросли для клеєної деревини ялини на 10,4%.

Деформівні характеристики незначно збільшуються або зменшуються та мали наступні значення: для клеєної деревини берези $u_{cI} = 0,00071$ (більше на

4,4%); вільхи $u_{cI}=0,00067$ (менше на 6,0%); ясена $u_{cI}=0,00062$ (більше на 8,8%); модрина $u_{cI}=0,00073$ (більше на 4,3%); сосни $u_{cI}=0,00064$ (фактично не змінилися); ялини $u_{cI}=0,00057$ (менше на 5,3%). Таким чином деформівність незначно збільшується або зменшується в ту чи іншу сторону.

Більш детально зупинимось на другій ділянці. Отже, для призм з клеєної деревини на верхній максимальній точці діаграми були зафіксовані наступні значення (рис.5.3а, рис.5.3б): берези міцність збільшилася на 19,3% та досягли відмітки $f_{c,0,d}=55,0$ МПа, тим часом критичні деформації дещо зменшилися на 6,5% і були зафіксовані на відмітці $u_{c,0,d,exp}=0,00493$ в порівнянні з показниками сухої деревини берези у віці 60 років; вільхи межа міцності стала більшою на 24,8% ($f_{c,0,d}=50,9$ МПа), критичні деформації зменшились на 3,4% ($u_{c,0,d,exp}=0,00450$; у клеєної деревини ясена міцність зросла на 16,4% ($f_{c,0,d}=66,6$ МПа), деформівність дещо зменшилась на 2,2% ($u_{c,0,d,exp}=0,00597$); модрина межа міцності зросла на 15,2% ($f_{c,0,d}=68,8$ МПа), а критичні деформації збільшилися на 5,0% ($u_{c,0,d,exp}=0,00672$); сосни гранична міцність стала більшою на 13,0% ($f_{c,0,d}=51,2$ МПа), деформівність зросла на 6,1% ($u_{c,0,d,exp}=0,00521$); ялини межа міцності збільшилися на 23,2% ($f_{c,0,d}=53,7$ МПа), критичні деформації впали на 3,1% ($u_{c,0,d,exp}=0,00453$).

Отже, межа міцності зразків з клеєної деревини хвойних та листяних порід збільшується на 13,0–24,8%, а деформівність в ту чи іншу сторону несуттєво зростає або спадає.

На третій ділянці граничні деформації клеєної деревини листяних та хвойних порід знаходимо за формулами (3.1–3.6). Отже, граничні деформації на кінець даної ділянки мали такі показники: для клеєної деревини берези $u_{c,u}=0,00802$ (більше на 3,1%); вільхи - $u_{c,u}=0,00671$ (більше на 5,8%); ясена - $u_{c,u}=0,01036$ (менше на 2,8%); модрина - $u_{c,u}=0,00848$ (менше на 3,1%); сосни - $u_{c,u}=0,00711$ (більше на 4,7%); ялини - $u_{c,u}=0,00704$ (більше на 8,5%).

Таким чином, деформівні показники на третій ділянці незначно збільшуються, окрім клеєної деревини модрина.

На четвертій ділянці наведемо тільки остаточні деформації за напружень $\sigma_{c,fin}=0,1f_{c,0,d}$, оскільки далі відбувалося руйнування зразків, а потім їх повне розвантаження. Відносні залишкові деформації клеєної деревини мали наступні показники: призми берези зменшились на 10,2% та досягли позначки $u_{c,fin}=0,3349$; вільхи – залишилась фактично на тих же відмітках ($u_{c,fin}=0,2796$); ясена – зросли на 12,7% ($u_{c,fin}=0,4793$); модрина – незначно збільшилась ($u_{c,fin}=0,4589$); сосни – практично не змінилися ($u_{c,fin}=0,3526$); ялини – зменшились на 14,1% ($u_{c,fin}=0,3042$).

Таким чином, на всіх ділянках діаграми спостерігалось збільшення міцності та несуттєві коливання в ту чи іншу сторону деформівності в порівнянні зі зразками суцільної деревини за стандартної вологості 12% віком 60 років.

5.1.3. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний)

За результатами експерименту призм клеєної деревини хвойних та листяних порід за жорсткого режиму випробувань побудовані діаграми «модуль деформацій – рівень напружень» (рис.5.4а, рис.5.4б), на основі яких встановлені початкові модулі пружності всіх зразків та модулі деформацій.

З побудованих графіків визначаємо початкові модулі пружності всіх досліджуваних порід клеєної деревини: берези ($E_0=15600$ МПа) більше на 26,8% в порівнянні зі зразками суцільної деревини вологістю 12% віком 60 років; вільхи – на 30,6% і склав $E_0=15800$ МПа; ясена – на 14,4% ($E_0=18300$ МПа); модрина – на 23,4% ($E_0=16900$ МПа); сосни – на 15,5% ($E_0=14900$ МПа); ялини – на 12,5% ($E_0=16200$ МПа).

Також встановлюємо зміну модуля деформацій (січного) на протязі від початку до рівня напружень $\eta=0,8$ для всіх призм (рис.5.19а, рис.5.19б): берези падає на 25,8%; вільхи – на 14,5%; ясена – на 28,0%; модрина – на 23,4%; сосни – на 11,2%; ялини – на 28,6%.

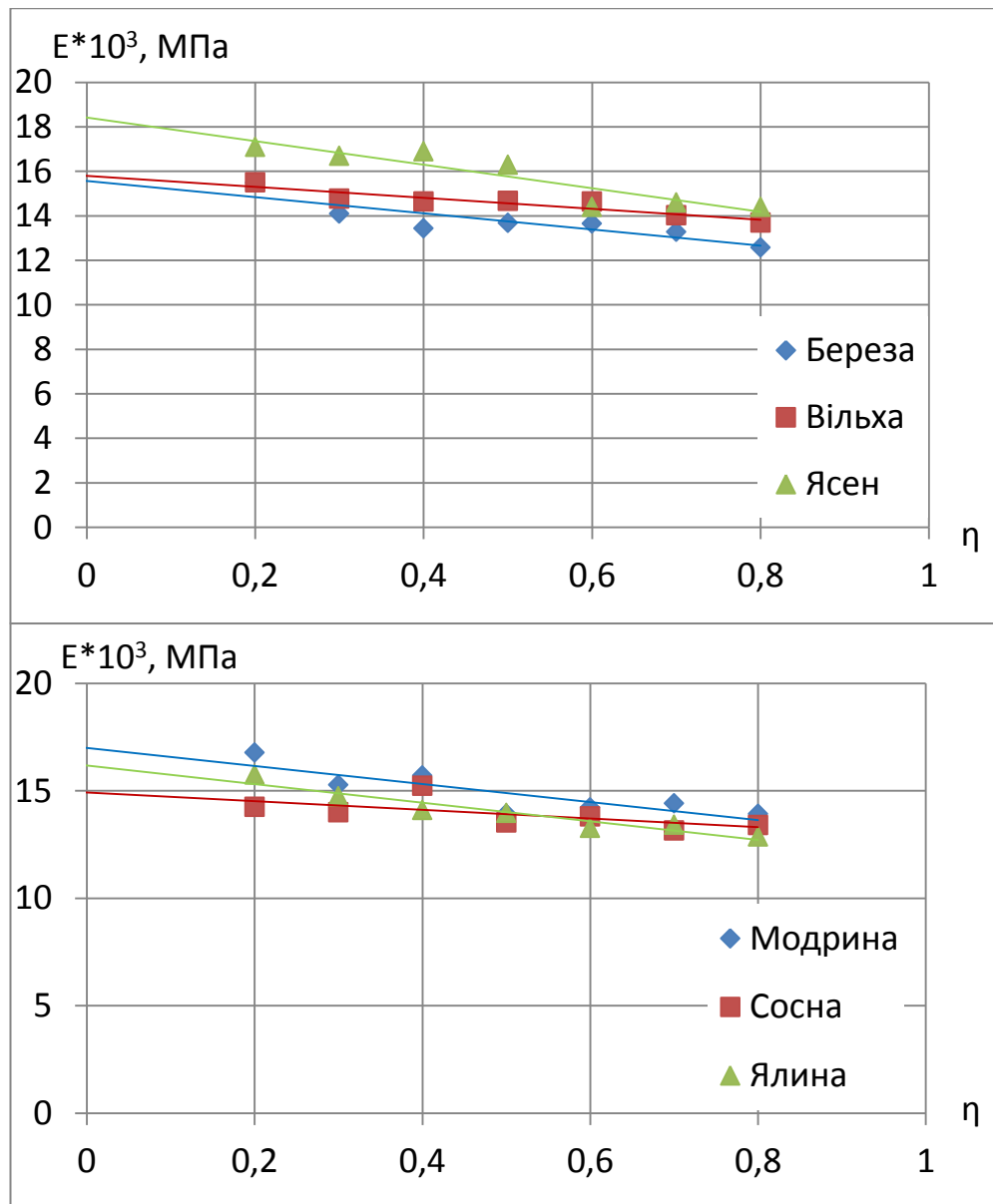


Рис.5.4. Діаграми «E-η» (січний модуль – рівень напружень) різних порід клеєної деревини: а) листяних; б) хвойних

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії « $E' - \eta$ » клеєної деревини наведені в табл. 5.2.

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії « E' – η » клеєної
деревини

Назва зразка	Кореляційне рівняння	r	m_r	$\frac{r}{m_r}$	$V, \%$
БК-Р	$E' = 15,565 \cdot (1 - 0,066 \cdot \eta)$	0,870	0,092	9	2,88
ВК-Р	$E' = 15,801 \cdot (1 - 0,048 \cdot \eta)$	0,927	0,053	17	1,36
ЯсК-Р	$E' = 18,414 \cdot (1 - 0,079 \cdot \eta)$	0,916	0,061	15	2,95
МК-Р	$E' = 16,994 \cdot (1 - 0,061 \cdot \eta)$	0,846	0,108	8	3,51
СК-Р	$E = 14,921 \cdot (1 - 0,037 \cdot \eta)$	0,832	0,157	5	4,09
ЯлК-Р	$E = 16,184 \cdot (1 - 0,081 \cdot \eta)$	0,953	0,034	28	1,91

5.1.4. Критичні деформації

На основі експериментальних досліджень та повних діаграм деформування «напруження-деформації» (рис.5.3а, рис.5.3б) клеєної деревини визначаємо критичні деформації $u_{c,0,d,exp}$ всіх зразків окремо для кожної породи. Усередненні значення критичних деформацій заносимо до табл.5.3.

Таблиця 5.3

Значення експериментальних та теоретичних показників усереднених
критичних деформацій клеєної деревини

№п/п	Порода деревини	К-сть призм шт.	Переріз зразків, мм	$f_{c,0,d}$ МПа	E_0 МПа	$u_{c,0,d,exp}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,0,d,th}$
1	Береза	6	30x30x120	55,0	15600	0,00493	0,00362	0,00180	0,00542
2	Вільха	6	30x30x120	50,9	15800	0,00435	0,00322	0,00154	0,00476
3	Ясен	6	30x30x120	66,6	18300	0,00590	0,00363	0,00265	0,00628
4	Модрина	6	30x30x120	63,8	16900	0,00672	0,00378	0,00242	0,00619
5	Сосна	6	30x30x120	52,2	14800	0,00516	0,00353	0,00162	0,00515
6	Ялина	6	30x30x120	53,7	16200	0,00453	0,00332	0,00171	0,00503

Критичні деформації клеєної деревини листяних та хвойних порід $u_{c,0,d,th}$ знаходимо теоретичним шляхом за формулою (2.9) (табл.5.3). При цьому коефіцієнт складає $c_1 = 5,94 \cdot 10^{-7} \text{ (МПа)}^{-2}$.

Таким чином значення критичних деформацій, визначених за формулою (2.9), мають наступні показники (табл. 5.3): берези збільшується на 5,14% ($u_{c,0,d,th}=0,00542$); вільхи – на 3,9% ($u_{c,0,d,th}=0,00476$); ясена – на 8,4% ($u_{c,0,d,th}=0,00542$); модрина стає меншою на 8,1% ($u_{c,0,d,th}=0,00619$); сосни зростає на 6,2% ($u_{c,0,d,th}=0,00515$); ялини також збільшується на 17,8% ($u_{c,0,d,th}=0,00503$).

Також проведемо окремий аналіз пружної та пластичної складової критичних деформацій за функцією (2.9).

Отже, пружна складова критичних деформацій понесла наступні зміни: для берези стала меншою на 3,6%; вільхи – на 8,4%; ясена – залишається на тій же відмітці; модрина – зменшується на 15,3%; сосни – фактично не змінюється; ялини – збільшується на 9,6% .

А пластична складова в цілому збільшується для всіх досліджуваних порід клеєної деревини: для берези на 29,5%; вільхи – на 41,3%; ясена – на 21,6%; модрина – на 3,9%; сосни – на 20,9%; ялини – на 37,9%.

Для критичних відносних деформацій, які визначені теоретичним шляхом, відбувається характерне несуттєве збільшення та зменшення значень в порівнянні з суцільною деревиною вологістю 12% віком 60 років.Таким же чином спостерігається зміна деформацій пружної складової функції (2.9), а от пластична складова значно збільшується на 3,9–41,3%.

Проведемо статистичний аналіз отриманих експериментальних та теоретичних результатів досліджень за всіма 36-ма зразками хвойних та листяних порід клеєної деревини (табл.5.4), (рис.5.5)

Статистична оцінка формули автора (2.9) з визначення критичних деформацій клеєної деревини хвойних та листяних порід

Формула для визначення критичних деформацій	Відхилення від експериментальних значень, %				
	$\Delta_{u,1}$	$\Delta_{u,2}$	Δ_u	σ_u	$\Delta_{u,max}$
$u_{c,0,d} = f_{c,0,d} / E_c + c_1 \cdot f_{c,0,d}^2$, де $c_1 = 5,94 \cdot 10^{-7} \text{ (МПа)}^{-2}$	-23,26	19,68	0,51	14,69	23,26
36 зразків. $\Delta_{u,1}$, $\Delta_{u,2}$ – нижня та верхня межі відхилень від експериментальних значень; Δ_u , σ_u – середньоарифметичні та стандартні значення цих відхилень; $\Delta_{u,max}$ – максимальне з $\Delta_{u,1}$ і $\Delta_{u,2}$.					

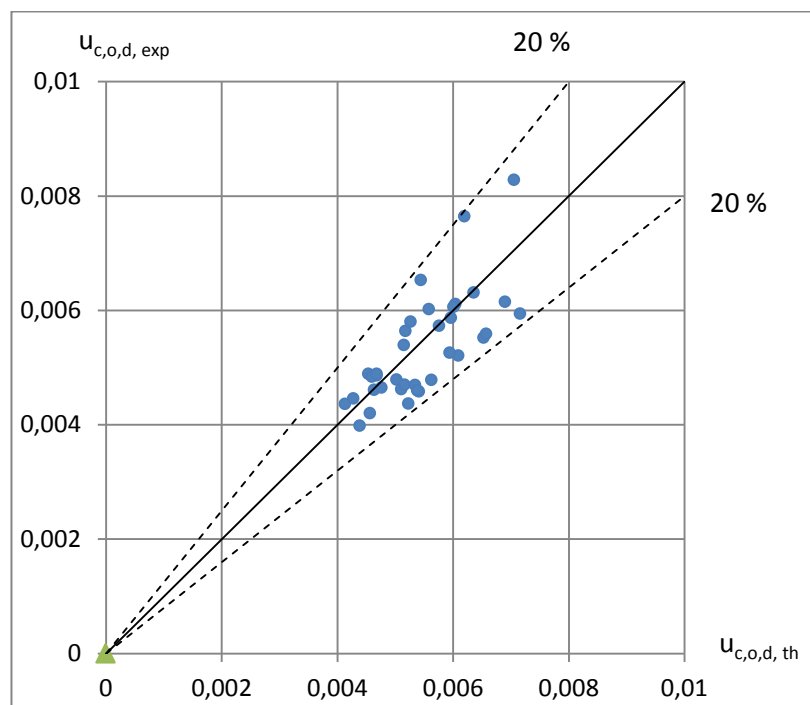


Рис.5.5. Відхилення експериментальних значень критичних деформацій від теоретичних за формулою автора (2.9) клеєної деревини листяних та хвойних порід

Отже, аналізуючи рис.5.5 та табл.5.4. приходимо до висновку, що збіжність теоретичних та експериментальних значень критичних деформацій є

задовільною незалежно від породи деревини. Максимальна розбіжність складає $\Delta_{u,\max}=23,26\%$.

5.1.5. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c »

Встановлення достовірності та адекватності запропонованої функції полінома 4-го ступеня (2.5) для зразків з клеєної деревини можливе через апроксимацію повних діаграм механічного стану всіх порід. Для цього визначимо коефіцієнти поліному w_1, w_2, w_3, w_4 в табличній формі та проводимо збіжність (табл.5.5).

Дійсні (повні) діаграми клеєної деревини «напруження σ_c – деформації u_c » побудовані за експериментальними значеннями та за формулою (2.5) наведені для берези на рис.5.6а, а для модрина - рис.5.6б.

Таблиця 5.5

Результати апроксимації дійсних (повних) діаграм листяних та хвойних порід клеєної деревини

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (2.5) та дослідних значень
	w_1	w_2	w_3	w_4	
Береза	18816,4	-8003,8	346,9	-3,4	0,956
Вільха	16689,7	-5272,5	287,2	-3,3	0,974
Ясен	18701,9	-8106,8	566,5	-5,8	0,971
Модрина	13607,7	-4382,4	271,8	-3,1	0,963
Сосна	4580,4	-5024,8	274,8	-3,0	0,950
Ялина	15596,5	-3859,5	171,7	-1,7	0,963

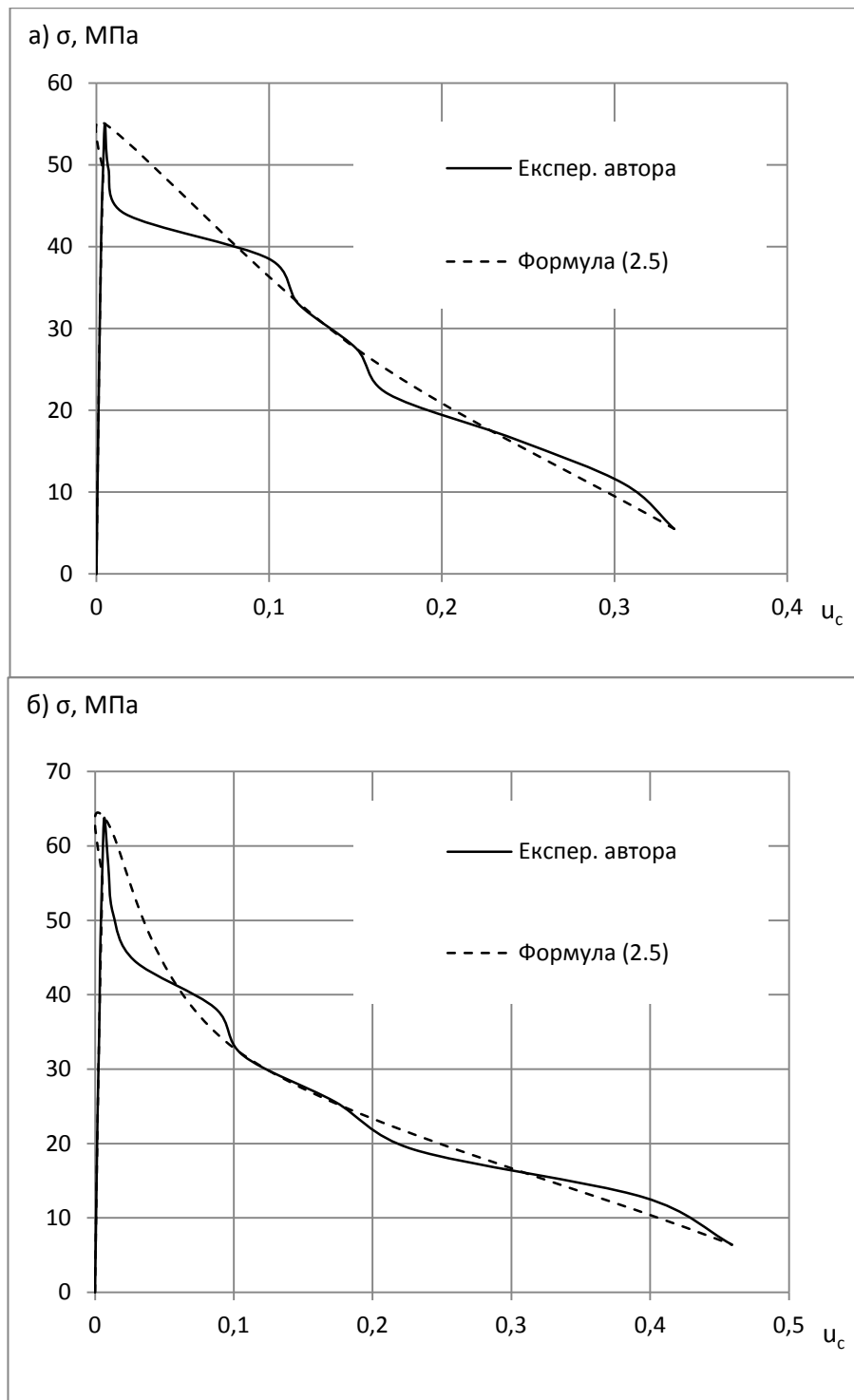


Рис.5.6. Дійсні (повні) діаграми клеєної деревини побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5): а) берези; б) модрини

Для інших порід мали подібний характер.

Збіжність результатів апроксимації є досить високою та знаходиться в межах $\eta=0,950\dots0,974$.

Отже, функція (2.5) в повній мірі підходить для апроксимації повних діаграм деформування зразків клеєної деревини конструкційних розмірів.

5.1.6. Поліпшення міцнісних та деформівних властивостей клеєної деревини

Другим способом, який сприяє поліпшенню міцнісних та деформівних властивостей, є склеювання деревини. Покажемо покращення основних параметрів за допомогою гістограм.

Отже, за результатами експериментальних досліджень та обробки результатів в даному підрозділі побудуємо динаміку зміни усереднених максимальних напружень зразків з клеєної деревини від впливу склеювання для всіх досліджуваних порід (рис.5.7), критичних деформацій (рис.5.8), граничних деформацій (рис.5.9) та початкового модуля пружності (рис.5.10).

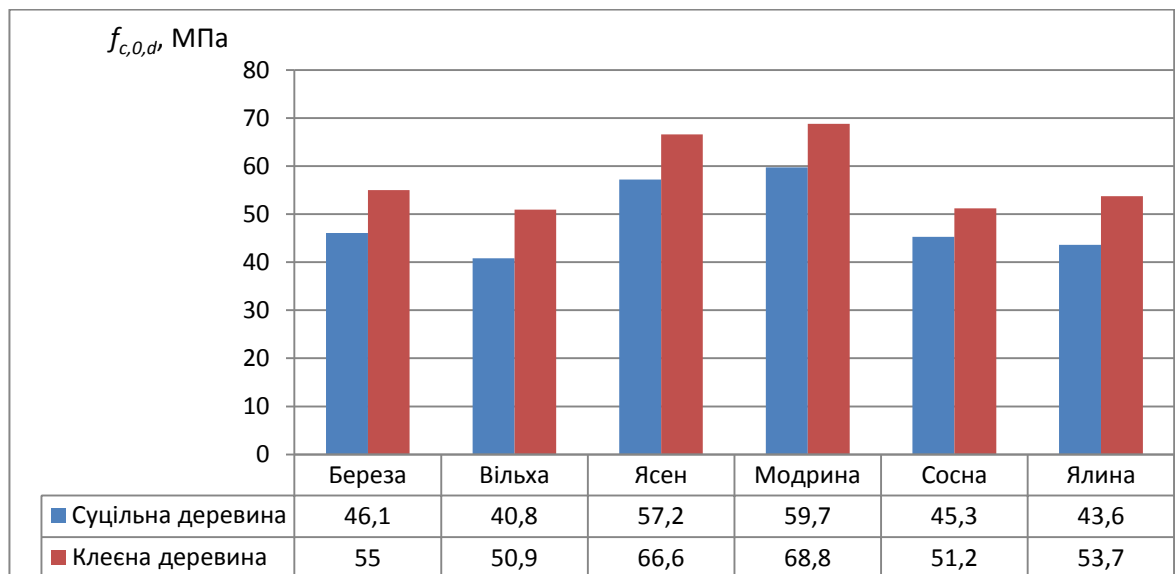


Рис.5.7. Динаміка зміни міцності (максимальних напружень) клеєної деревини

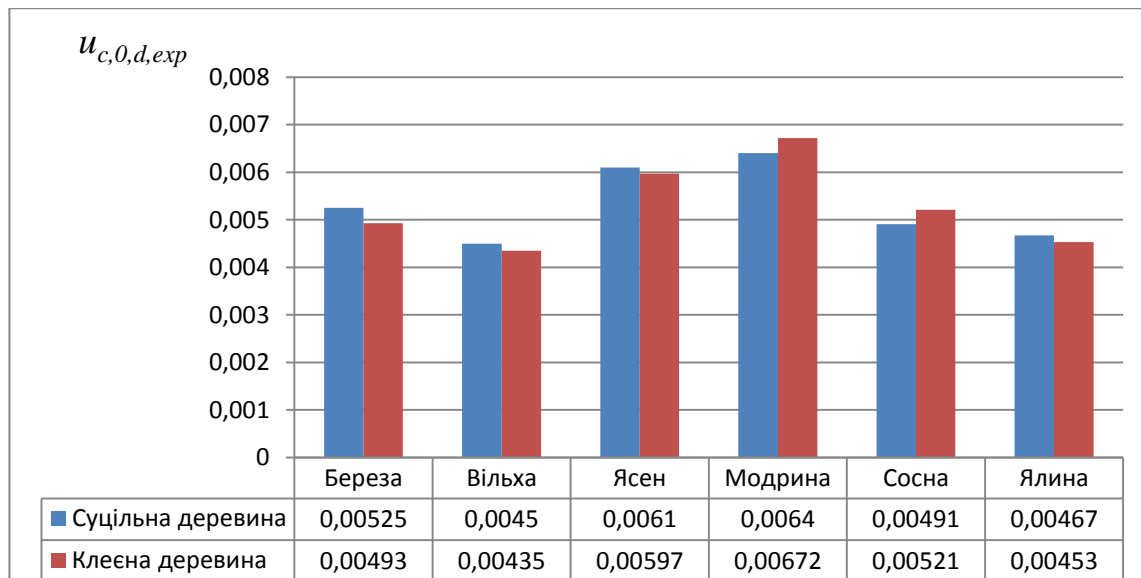


Рис.5.8. Динаміка зміни критичних деформацій $u_{c,0,d,exp}$ клеєної деревини

Динаміку зміни основних параметрів клеєної деревини проаналізовано в попередніх параграфах, тому не будемо детально зупинятись на даних аспектах. А тільки наведемо загальну картину, отже, міцність клеєної деревини збільшується в порівнянні з показниками суцільної вологістю 12% віком 60 років на 13–25%; критичні деформації несуттєво збільшуються або зменшуються в ту чи іншу сторону; граничні деформації незначно зростають, окрім клеєної деревини модрина; початковий модуль пружності збільшується на 13–31%.

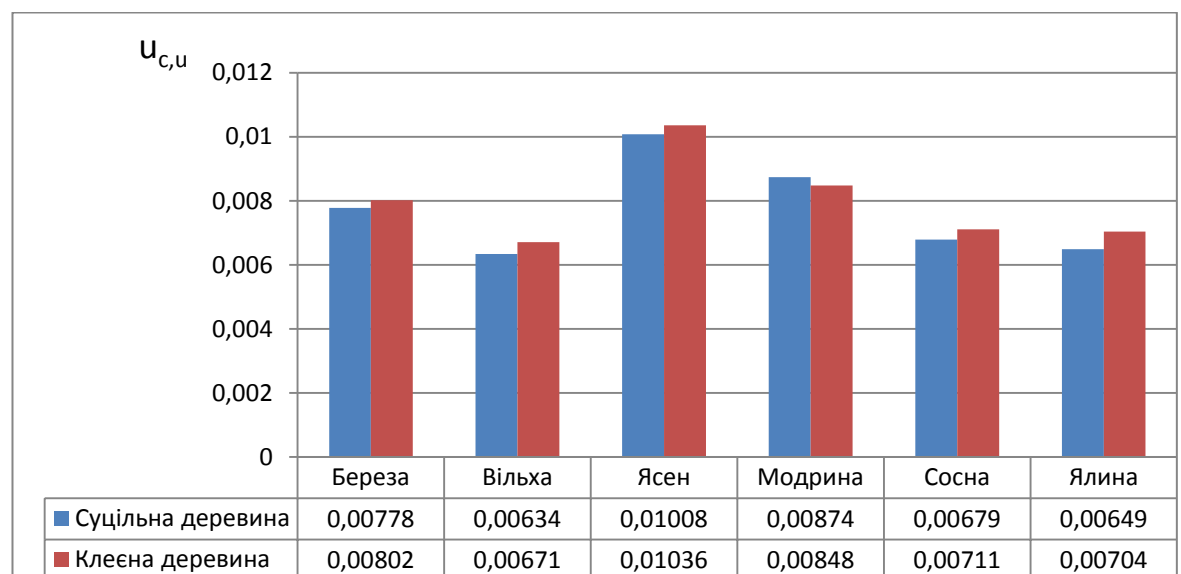


Рис.5.9. Динаміка зміни граничних деформацій $u_{c,u}$ клеєної деревини

Таке поліпшення зумовлене потраплянням клею в тіло деревини, тобто внаслідок склеювання відбувається модифікація деревини та утворення композиційного матеріалу. На міцність такої композиції безпосередньо впливає товщина доски. Чим менша товщина доски, тим міцніший виріб.

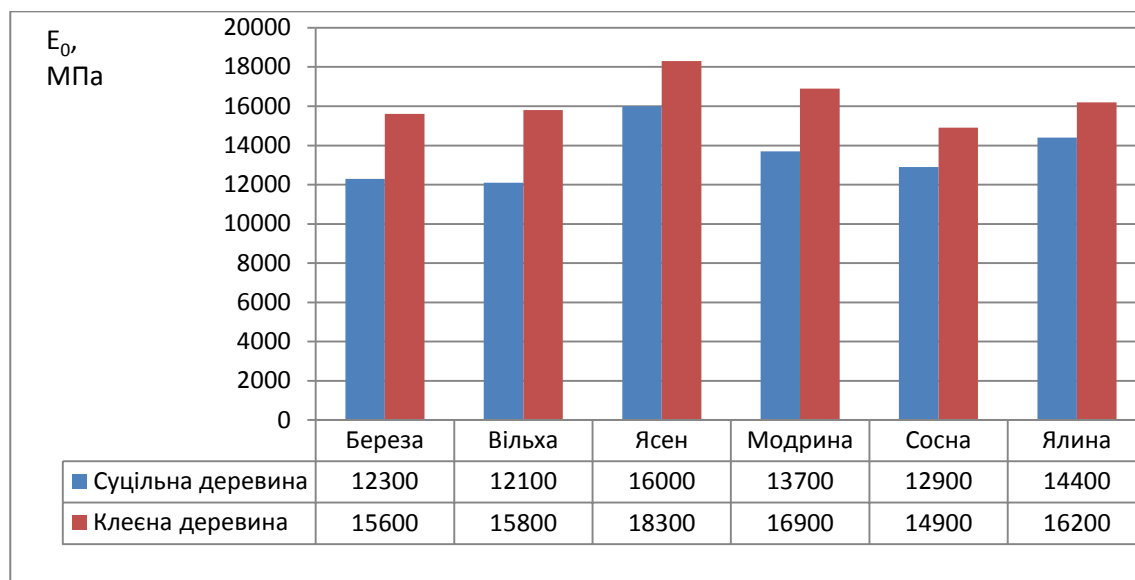


Рис.5.10. Динаміка зміни початкового модуля пружності клеєної деревини

В наших дослідження ми можемо також спостерігати таку картину для деревини сосни, зокрема для II та III серії випробувань. Отже, при товщині доски 15 мм (II серія випробувань) усереднена міцність була зафіксована на позначці $f_{c,0,d}=48,6$ МПа, а при – 10 мм (III серія випробувань) – $f_{c,0,d}=51,2$ МПа.

5.2. Клеєна модифікована деревина за м'якого режиму випробувань (III серія випробувань)

Одним із перших досліджень, що стосувалось випробувань композиційних матеріалів на основі деревини – це була клеєна деревина модифікована полімерною композицією «силор» конструкційних розмірів перерізом 45x45x250 мм за м'якого режиму випробувань (за приростом навантажень).

Методика виготовлення та проведення експериментальних досліджень таких зразків наведена в розділі 2.

Аналіз основних міцнісних та деформівних характеристик модифікованої деревини будемо проводити в порівнянні із клеєними призмами за стандартної вологості 12% перерізом 45x45x250 мм.

5.2.1. Визначення оптимального часу просочення полімерної композиції «силор» в тіло деревини за поверхневої модифікації

Першою головною метою III серії випробувань – це встановлення оптимального часу просочення полімерної композиції «силор» в тіло деревини сосни, за якої зразок набуває максимальної міцності. З огляду на мету, просочення дослідних призм виконували групами шляхом занурення в посудину із полімерною композицією: перша група ПС-15 на 15хв, друга - ПС-30 на 30хв, третя - ПС-60 - 60хв, четверта - ПС-120 – 120хв, п'ята - ПС-240 – 240хв, шоста - ПС-360 - 360хв та сьома - ПС-720 на 720хв. В кожній групі було по п'ять зразків–близнюків, які були модифіковані із заданою тривалістю. Проникнення полімерної композиції «силор» в товщу зразків проходило природнім шляхом, без додаткового стимулювання, в посудині в горизонтальному положенні при повному зануренні в полімерний розчин.

За результатами експерименту, який був проведений в стінах НУВГП за м'якого режиму випробувань, було визначено міцність зразків різних марок (табл.5.6, рис.5.11). А також встановлено оптимальний час просочення полімерної композиції, за якої призма досягає максимальної міцності. Отже, новий утворений композиційний матеріал на основі деревини сосни та полімерної композиції «силор» має оптимальний час – 720 хв, за якого зразок досягає найбільшої міцності $f_{c,0,d}=57,7$ МПа, що на 19,0% більше, ніж клеєної деревини. Після 12 год просочення «силором» починається процес твердіння.

Збільшення міцності зразків клеєної модифікованої деревини сосни

№ п/п	Позначення зразків	Тривалість просочення, хв	Середнє руйнівне $f_{c,0,d}$, МПа	Відсоткове збільшення міцності, %
1	П-0	-	48,57	0
2	ПС-15	15	50,43	3,8
3	ПС-30	30	50,80	4,6
4	ПС-60	60	51,74	6,5
5	ПС-120	120	53,50	10,1
6	ПС-240	240	55,34	13,9
7	ПС-360	360	56,59	16,5
8	ПС-720	720	57,74	19,0

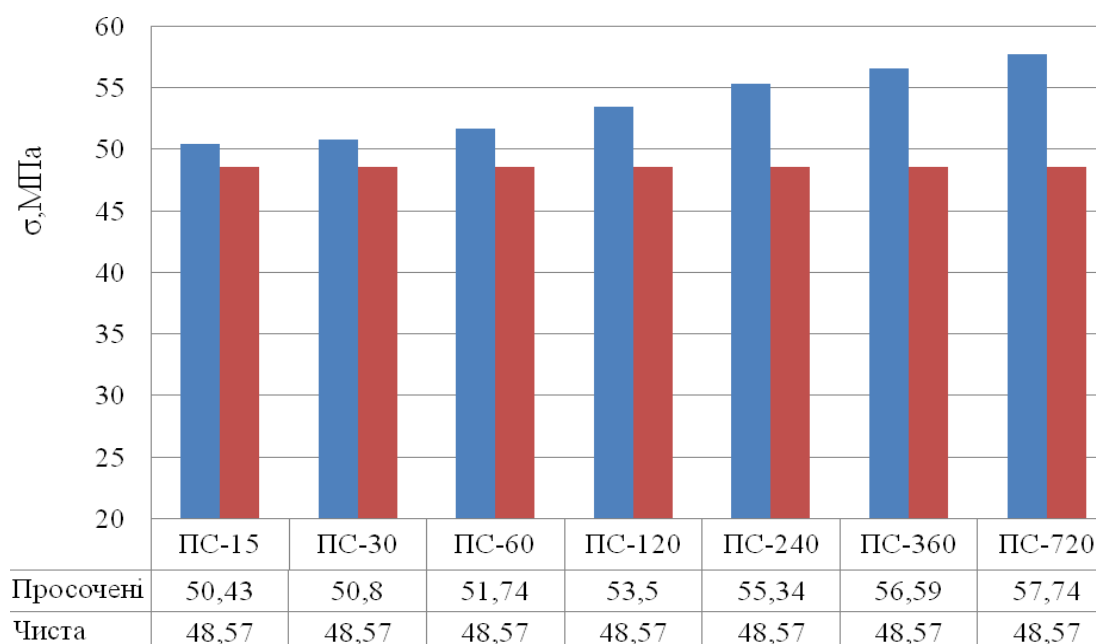


Рис. 5.11. Гістограма збільшення середніх значень міцності зразків модифікованої деревини сосни в порівнянні зі звичайною клеєною

Отже, аналізуючи гістограму (рис.5.11), приходимо до висновку, що модифікація деревини сприяє збільшенню міцності та безпосередньо залежить від часу просочення.

Руйнування модифікованої клеєної деревини проходило подібно до руйнування клеєної деревини з утворенням складки та ліній ковзання (рис.5.12).



Рис 5.12. Дослідний зразок після випробувань

5.2.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний)

За результатами експериментальних досліджень зразків клеєної та модифікованої полімерною композицією «СИЛОР» деревини листяних та хвойних порід на стиск вздовж волокон з рівним терміном просочення були побудовані графіки «модуль деформацій – рівень напружень» (рис.5.13).

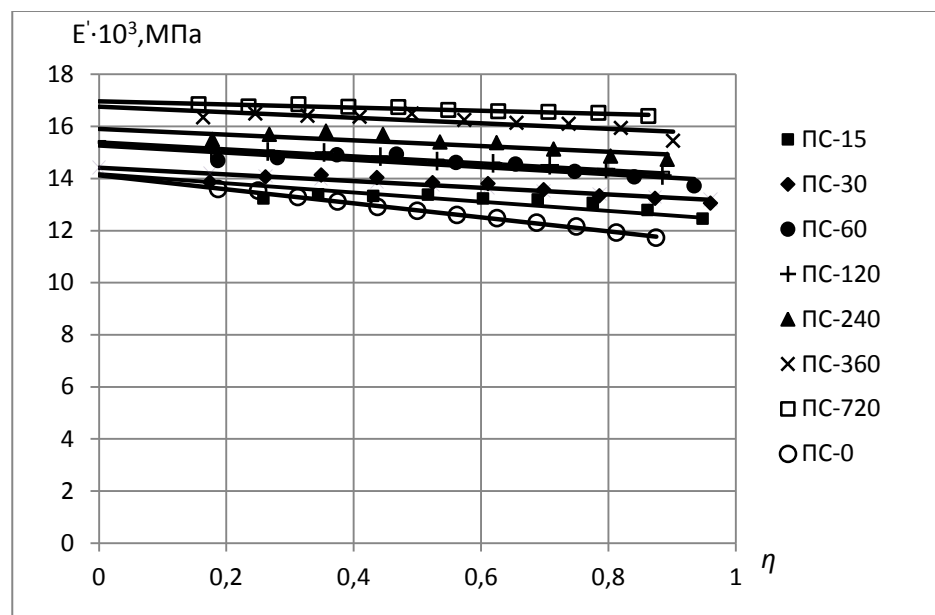


Рис.5.13. Діаграми $E' - \eta$ (січний модуль - рівень напружень) модифікованої клеєної деревини сосни

Методика визначення наведена в розділі 2. Отже, згідно рис.5.13 та табл.5.7 визначено початкові модулі пружності наступних композиційних матеріалів марок: ПС-0 – $E_0=14100$ МПа; ПС-30 – $E_0=14200$ МПа; ПС-60 – $E_0=14400$ МПа; ПС-120 – $E_0=15300$ МПа; ПС-240 – $E_0=15900$ МПа; ПС-360 – $E_0=16800$ МПа; ПС-720 – $E_0=17000$ МПа.

Як видно з рис.5.12 та табл.5.7 початкові модулі пружності композиційних матеріалів просочених полімерною композицією «силор» зростають в порівнянні зі звичайною клеєною деревиною та досягають максимальних значень за 720 хв (збільшуються на 20,6%).

Таблиця 5.7

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії

Назва зразка	Кореляційне рівняння	r	m_r	r/m_r	$V, \%$
ПС-0	$E' = 14,121 \cdot (1 - 0,068 \cdot \eta)$	0,998	0,001	734	0,27
ПС-15	$E' = 14,170 \cdot (1 - 0,035 \cdot \eta)$	0,828	0,105	8,0	1,51
ПС-30	$E' = 14,414 \cdot (1 - 0,025 \cdot \eta)$	0,840	0,057	16	1,04
ПС-60	$E' = 15,268 \cdot (1 - 0,027 \cdot \eta)$	0,859	0,088	10	1,36
ПС-120	$E' = 15,386 \cdot (1 - 0,025 \cdot \eta)$	0,982	0,011	77	0,92
ПС-240	$E' = 15,904 \cdot (1 - 0,020 \cdot \eta)$	0,819	0,104	8	1,21
ПС-360	$E' = 16,758 \cdot (1 - 0,019 \cdot \eta)$	0,830	0,099	8	0,99
ПС-720	$E' = 16,964 \cdot (1 - 0,010 \cdot \eta)$	0,960	0,025	39	0,22

5.2.3. Деформівність клеєної деревини модифікованої полімерною композицією «силор»

За результатами проведеного експерименту побудовані діаграми «напруження-деформації» при роботі зразків на стиск вздовж волокон (рис.5.14).

Отримані результати досліджень за середнього відносного деформування клеєної та модифікованої деревини в залежності від тривалості просочення полімерною композицією «силор» за напружень в 40 МПа приведені у вигляді гістограми на рис.5.15. Із гістограми видно, що із ростом тривалості просочення клеєної деревини відносні деформації модифікованої клеєної деревини зменшуються, як вздовж волокон, так і поперек. Найменше деформується модифікована деревина, яка просочувалася силором на протязі 720 хвилин.

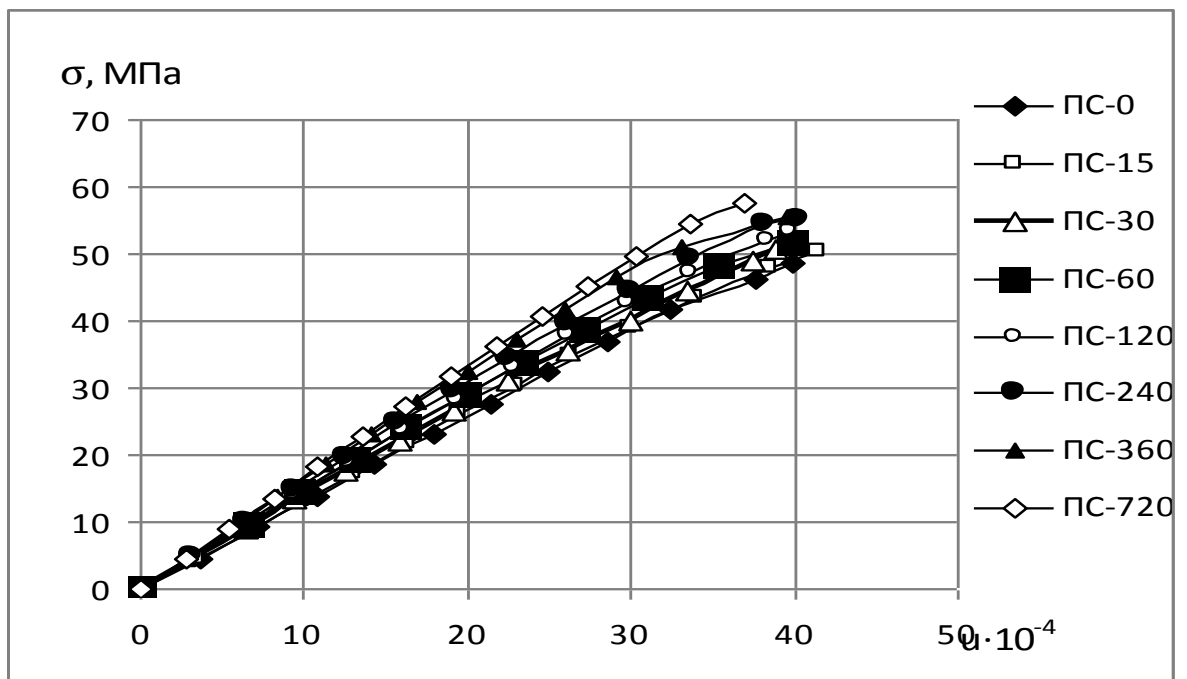


Рис.5.14. Діаграми деформування модифікованої деревини « $\sigma_c - \epsilon_c$ » за роботи на стиск вздовж волокон

Отже, відносні деформації композиційних матеріалів, які модифіковані протягом 12 год, зменшилися: вздовж волокон на 22,3%; поперечні - перпендикулярні до клеєвого шва на 27,1%; поперечні паралельні клеєвому шву на 45,4%. Таким чином, модифікація клеєної деревини найбільшим чином вплинула на відносні поперечні деформації, які паралельні клеєвому шву.

Доцільно також визначити критичні деформації клеєної деревини та клеєної модифікованої деревини хвойних та листяних порід з різним терміном

просочення полімерної композиції «силор». Оскільки, експериментальні дослідження були проведені за м'якого режиму (за приростом навантажень), то встановити критичні деформації практично неможливо. Але для визначення таких показників скористаємось залежностями (2.8, 2.9) та визначимо їх теоретично, але при цьому будемо змінювати коефіцієнт c_1 , тому що композиційні матеріали на основі деревини мають дещо інші міцнісні та деформівні характеристики.

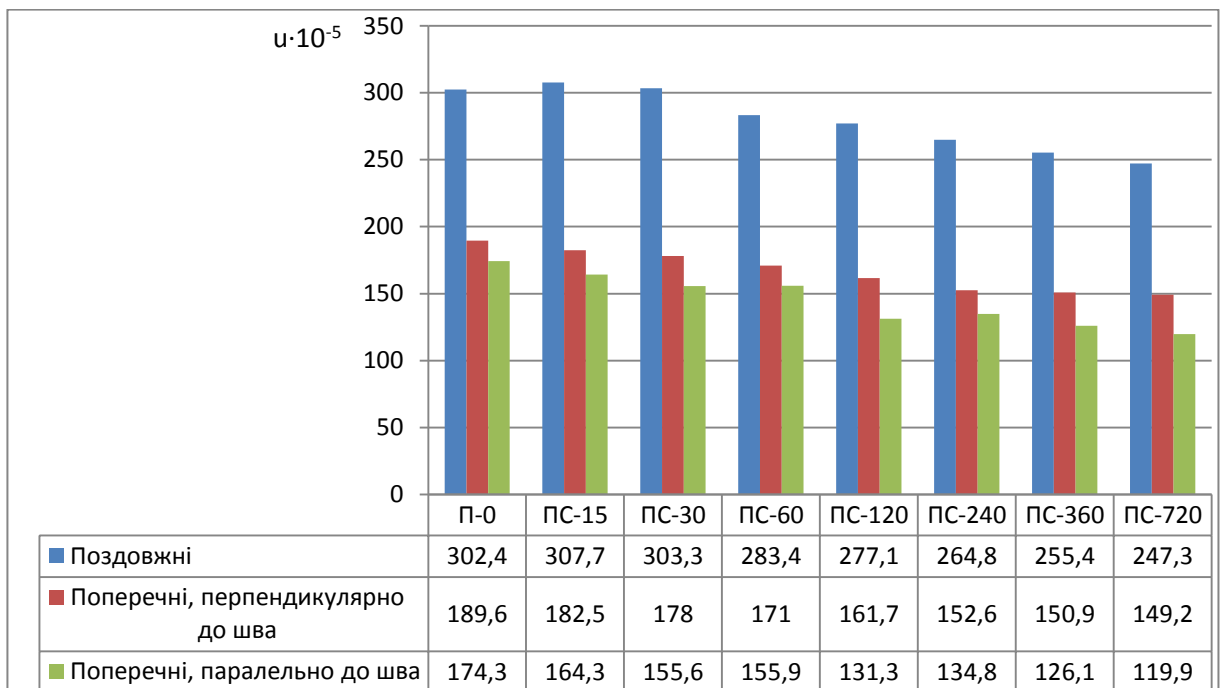


Рис.5.15. Гістограма середніх відносних деформацій дослідних зразків з клеєної модифікованої деревини за напружень $\sigma_c = 40$ МПа

Отже, розрахунок значень критичних деформацій $u_{c,0,d,th}$, а також їх пружних $u_{c,el,th}$ та пластичних складових $u_{c,pl,th}$, будемо проводити в табличній формі (табл.5.8), записуючи при цьому наступні вихідні дані: поперечний переріз зразка; максимальні напруження $f_{c,0,d}$; початковий модуль пружності E_0 ; коефіцієнт c_1 .

Аналізуючи значення табл.5.8, приходимо до висновку, що критичні деформації клеєної деревини сосни модифікованої «силором», визначені за формулою (2.9) та пластична складова значно зменшуються в порівнянні з

показниками звичайної клеєної. А пружна фактично залишається на тих же позначках.

Таблиця 5.8

Значення теоретичних показників усереднених критичних деформацій клеєної та клеєної модифікованої деревини сосни

№ _{п/п}	Марка	К-сть призм шт.	Переріз зразків, мм	$f_{c,0,d}$ МПа	E_0 , МПа	$c_1 \cdot 10^{-7}$, (МПа) ⁻²	$u_{c,el,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,0,d,th}$
1	П-0	6	45x45x250	48,6	14100	5,94	0,00344	0,00140	0,00484
2	ПС-15	6	45x45x250	50,4	14200	4,80	0,00355	0,00122	0,00477
3	ПС-30	6	45x45x250	50,8	14400	4,45	0,00353	0,00115	0,00468
4	ПС-60	6	45x45x250	51,7	15300	4,08	0,00338	0,00109	0,00447
5	ПС-120	6	45x45x250	53,5	15400	3,26	0,00347	0,00093	0,00440
6	ПС-240	6	45x45x250	55,3	15900	2,74	0,00348	0,00084	0,00432
7	ПС-360	6	45x45x250	56,6	16800	2,56	0,00337	0,00082	0,00419
8	ПС-720	6	45x45x250	57,7	17000	2,28	0,00339	0,00076	0,00415

Отже, підсумовуючи експериментальні дослідження III серії випробувань, зазначимо, що міцність зразків, початкові модулі пружності та модулі деформацій отриманих композиційних матеріалів на основі деревини сосни та полімерної композиції «силор» зростають в порівнянні зі звичайною клеєною. А деформівність призм зменшується.

5.3. Суцільна деревина модифікована полімерною композицією «силор» за жорсткого режиму випробувань (IV серія випробувань)

Головною метою нашої роботи є поліпшення міцнісних та деформівних властивостей деревини хвойних та листяних порід з використанням різних способів. В третьому розділі було показано, що покращення фізико-механічних властивостей можливе за рахунок сушіння деревини, а в четвертому розділі

поліпшення таких характеристик можливе в залежності від вибору віку. В даному параграфі параметри міцності та деформівності деревини будемо поліпшувати внаслідок зміни властивостей матеріалу за рахунок поверхневої на протязі 12 годин та глибинної модифікації суцільної деревини полімерною композицією «силор». Поверхнева модифікація є найбільш простим технологічним процесом та й мінімально трудоемким. Проте глибинна модифікація дає більш вагомий ефект в поліпшенні фізико-механічних властивостей деревини.

5.3.1. Поверхнева модифікація

5.3.1.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c »

За результатами експериментальних досліджень призм-близнюків композиційних матеріалів на основі деревини хвойних і листяних порід та полімерної композиції «силор» перерізом 30x30x120 мм за поверхневої модифікації отримані дійсні (повні) діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » (рис.5.16а, рис.5.16б), а також визначені основні характеристики міцності і деформівності на всіх чотирьох ділянках.

Аналіз будемо проводити в порівнянні зі зразками, які були досліджені за стандартної вологості 12% віком 60 років.

На першій ділянці нові утворені композиційні матеріали на основі листяних порід та «силору» (Рис.5.16а) мають наступні показники: для деревини берези напруження зростає на 6,7% ($\sigma_{cl}= 9,5$ МПа), а відносні деформації зменшуються на 15,2% ($u_{cl}=0,00059$); для деревини вільхи міцнісні показники збільшуються на 10,4% ($\sigma_{cl}= 7,4$ МПа), а деформівність падає на 65,1% ($u_{cl}=0,00043$); для деревини ясена напруження практично не змінюється $\sigma_{cl}= 8,7$ МПа при цьому відносні деформації зразків зменшуються на 26,7% ($u_{cl}=0,00045$).

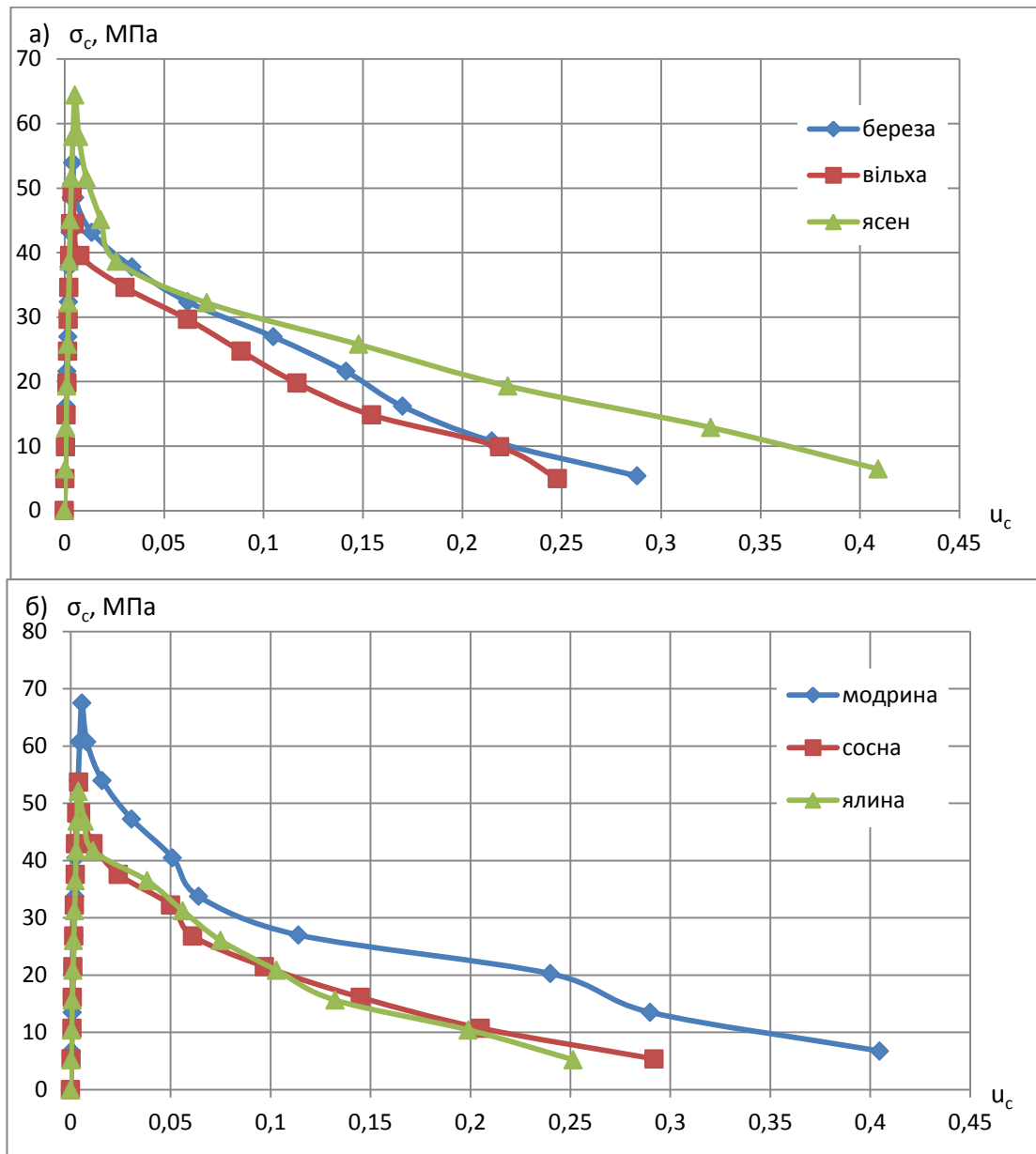


Рис.5.16. Дійсні (повні) діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » композиційних матеріалів на основі деревини різних порід та полімерної композиції «силор» за поверхневої модифікації: а) листяних; б) хвойних

На цій же ділянці для хвойних порід (Рис.5.16б) спостерігається схожа тенденція: зокрема для зразків на основі деревини модрина напруження зростають на 4,4% та досягають позначки $\sigma_{cI} = 9,4$ МПа, а повздовжні відносні деформації незначно зменшуються на 6,1% ($u_{cI} = 0,00066$); для сосни також напруження на даній ділянці дещо збільшуються на 8,5% ($\sigma_{cI} = 8,9$ МПа),

деформівність зменшується на 12,5% ($u_{cl}=0,00056$); для деревини ялини напруження незначно зростають на 3,0% ($\sigma_{cl}= 6,9$ МПа), а деформації зразка падають на 39,5% ($u_{cl}=0,00043$).

Аналізуючи, в цілому, першу ділянку діаграм механічного стану композиційних матеріалів всіх порід за поверхневої модифікації приходимо до висновку, що міцність деревини за поверхневої модифікації незначно зростає в межах на 3,0–10,7%, а деформівність зменшується з великим розкидом – від 6,1% до 65,1%.

Отже, експериментальні значення, композиційних матеріалів листяних порід (закінчення II ділянки, вершина діаграми «напруження-деформації») за поверхневої модифікації, максимальні напруження (тимчасова міцність) та критичних деформацій мають наступні значення (рис.5.16а): для деревини берези міцність зростає на 16,9% в порівнянні з необробленою деревиною та досягають відмітки $f_{c,0,d}=53,9$ МПа, деформівність зразків зменшується на 24,7% ($u_{c,0,d,exp}=0,00421$); міцність призм на основі поверхнево модифікованої вільхи збільшується на 21,7% ($f_{c,0,d}=49,4$ МПа), критичні деформації падають на 16,6% до позначки $u_{c,0,d,exp}=0,00386$; максимальні граничні напруження деревини ясена зростають на 11,6% ($f_{c,0,d}=57,7$ МПа), при цьому деформівні показники зменшуються на 17,1% ($u_{c,0,d,exp}=0,00521$).

На цій же ділянці повної діаграми «напруження-деформації» міцнісні та деформівні показники композиційних матеріалів на основі хвойних порід становлять (рис.5.16б): міцність поверхнево обробленої модрина зросла на 13,1% та досягли відмітки $f_{c,0,d}=67,5$ МПа в порівнянні з необробленою, критичні деформації зменшилися для цього композиційного матеріалу на 13,7% ($u_{c,0,d,exp}=0,00564$); міцність сосни модифікованої «силором» складає $f_{c,0,d}=53,7$ МПа, що на 18,5% більше ніж за стандартної вологості 12%, в той час деформівні показники для неї зменшилися на 34,9% ($u_{c,0,d,exp}=0,00407$); для ялини міцність зросла на 19,5% ($f_{c,0,d}=52,1$ МПа), а деформівність зменшилася на 22,3% до позначки $u_{c,0,d,exp}=0,00467$.

На другій ділянці міцнісні параметри композиційних матеріалів на основі листяних та хвойних порід збільшуються на 11,6–21,7% в порівнянні із призмами суцільної деревини вологістю 12% віком 60 років. Деформівність, за рахунок модифікації, зменшується в межах 13,7–34,9 %.

На третій ділянці граничні деформації модифікованої деревини листяних та хвойних порід будемо знаходити таким же чином, як і для клеєної деревини, за формулами (3.1–3.6). Отже, граничні деформації на кінець даної ділянки мали такі показники: для деревини берези $u_{c,u}=0,00645$ (менше на 20,6%); вільхи – $u_{c,u}=0,00530$ (менше на 19,6%); ясена – $u_{c,u}=0,00865$ (менше на 16,5%); модрина – $u_{c,u}=0,00763$ (менше на 14,5%); сосни – $u_{c,u}=0,00593$ (менше на 14,4%); ялини – $u_{c,u}=0,00560$ (менше на 15,9%).

Таким чином, деформівні показники на третій ділянці, зменшуються на 14–21% в порівнянні зі значеннями суцільної деревини вологістю 12% віком 60 років.

Остання четверта ділянка характеризується різким збільшення відносних деформацій, як і для зразків із суцільної деревини різної вологості та віку, на спадній вітці діаграми «напруження–деформації». Остаточні деформації вдалося зафіксувати приблизно за тих же напружень, що і для необроблених композитом призм. Після цього проводилося розвантаження всіх зразків. Отже, остаточні відмітки відносних деформацій зразків композиційних матеріалів на основі деревини, які вдалося нам зафіксувати, мали наступні значення: деревини берези - $u_{c,fin}=0,2886$ (на 27,9% менше від необробленої); вільхи $u_{c,fin}=0,2482$ (на 11,2% менше); ясена $u_{c,fin}=0,4093$ (на 3,9% менше); модрина $u_{c,fin}=0,4047$ (на 11,1% менше); сосни $u_{c,fin}=0,2919$ (на 16,9% менше); ялини $u_{c,fin}=0,2564$ (на 35,4 % менше).

В цілому, на даній ділянці спостерігається зменшення деформівності суцільної деревини в межах 4–35%.

Приходимо до висновку, що модифікація деревини (поверхнева) сприяє зміні основних показників діаграми деформування зразків композиційних матеріалів на основі листяних та хвойних порід та полімерної композиції

«силор» на всіх її ділянках, зокрема збільшує міцнісні показники та зменшує деформівні. Зазначимо, що дані характеристики на різних ділянках змінюються по різному.

5.3.1.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний)

На основі експерименту були отримані діаграми «E- η » (січний модуль – рівень напружень) (рис.5.17а, рис.5.17б), на основі яких визначені початкові модулі пружності та модулі деформацій всіх досліджуваних композиційних матеріалів за поверхневої модифікації.

Отже, були отримані наступні показники початкового модуля пружності утворених нових композиційних матеріалів на основі деревини:

- листяних порід (рис.5.17а): берези $E_0=17900$ МПа (на 45,6% більше), вільхи $E_0=18800$ МПа (на 55,4% більше), ясена $E_0=19700$ МПа (на 23,1% більше);

- для хвойних порід (рис.5.17б): модрина $E_0=19600$ МПа (на 43,1% більше), сосни $E_0=18200$ МПа (на 41,1% більше), ялини $E_0=19100$ МПа (на 32,6% більше).

Приходимо до висновку, що початковий модуль пружності досліджуваних зразків є більшим на 23–55% в порівнянні з показниками за стандартної вологості 12% віком 60 років.

Проаналізуємо зміну модуля деформацій таким же чином, як і для інших призм-близнюків. Також спостерігалось зменшення величини січного модуля, але дещо в іншому діапазоні: для деревини берези на 20,9%; вільхи на 30,6%; ясена на 37,8%; модрина на 43,1%; сосни на 11,0%; ялини на 23,2%.

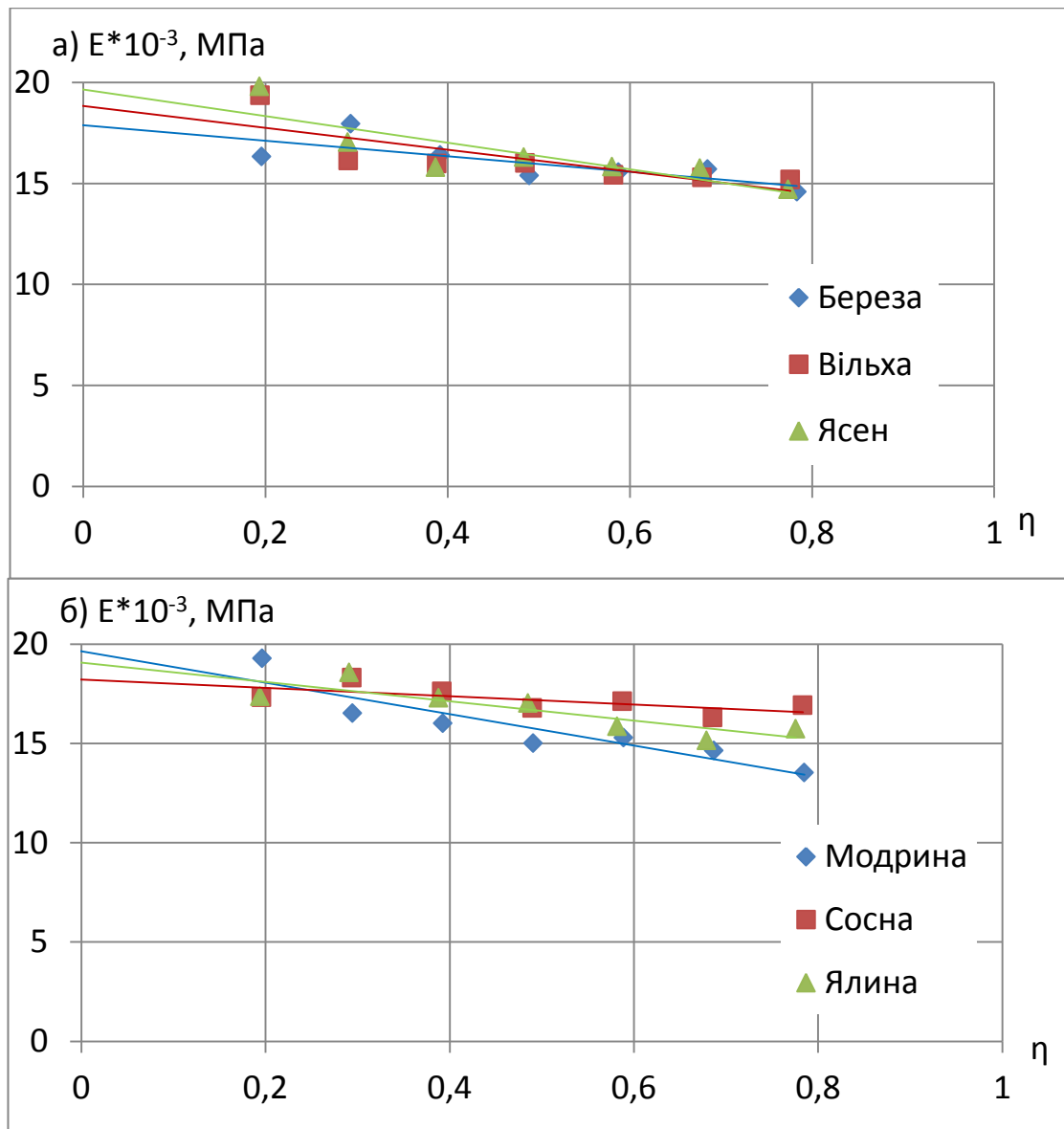


Рис.5.17. Діаграми « $E-\eta$ » (січний модуль – рівень напружень) композиційних матеріалів на основі різних порід деревини та полімерної композиції «силор» за поверхневої модифікації: а) листяних; б) хвойних

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії поверхнево модифікованої деревини полімерною композицією «силор» наведено в табл.5.9.

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії
поверхнево модифікованої деревини полімерною композицією «силор»

Назва зразка	Кореляційне рівняння	r	m _r	r/m _r	V, %
БСМ-П	$E' = 17,884 \cdot (1 - 0,070 \cdot \eta)$	0,768	0,070	18	3,80
ВСМ-П	$E' = 18,837 \cdot (1 - 0,106 \eta)$	0,786	0,145	5	4,81
ЯсСМ-П	$E' = 19,658 \cdot (1 - 0,099 \cdot \eta)$	0,844	0,109	8	4,63
МСМ-П	$E' = 19,636 \cdot (1 - 0,025 \cdot \eta)$	0,917	0,060	15	4,00
ССМ-П	$E' = 18,219 \cdot (1 - 0,038 \cdot \eta)$	0,787	0,149	5	5,52
ЯлСМ-П	$E' = 19,068 \cdot (1 - 0,090 \cdot \eta)$	0,857	0,100	8	3,33

5.3.1.3. Критичні деформації модифікованої деревини

За діаграмами «напруження σ_c – деформації u_c » композиційних матеріалів на основі деревини (рис.5.16а, рис.5.16б) визначаємо критичні деформації $u_{c,0,d,exp}$ всіх зразків. Усереднені значення критичних деформацій показані в табл.5.10.

Критичні деформації модифікованої деревини листяних та хвойних порід $u_{c,0,d}$, знаходимо теоретичним шляхом за формулою (2.9) (табл.5.10). При цьому коефіцієнт $c_1 = 4,69 \cdot 10^{-7}$ (МПа)⁻² для композиційних матеріалів за поверхневої модифікації з терміном просочення 720 хв. Також в даній таблиці є дві складові – пружна $u_{c,el,th}$ та пластична $u_{c,pl,th}$.

Таким чином значення критичних деформацій, визначених за формулою (2.9), в основному зменшилися в порівнянні з показниками зразків за вологості 12% віком 60 років: на основі деревини берези на 17,6% ; вільхи на 21,8%; ясеня на 10,5%; модрина на 20,1%; сосни на 12,8%; ялини на 6,8%.

Таблиця 5.10

Значення експериментальних та теоретичних показників усереднених критичних деформацій композиційних матеріалів на основі деревини та полімерної композиції «силор» за поверхневої модифікації

№ _{п/п}	Порода деревини	К-сть призм шт.	Переріз зразків, мм	$f_{c,0,d}$ МПа	E_0 , МПа	$u_{c,0,d,exp}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,0,d,th}$
1	Береза	6	30x30x120	53,9	17900	0,00421	0,00301	0,00136	0,00437
2	Вільха	6	30x30x120	49,4	18900	0,00386	0,00261	0,00115	0,00376
3	Ясен	6	30x30x120	64,4	19600	0,00521	0,00329	0,00195	0,00524
4	Модрина	6	30x30x120	67,5	19700	0,00564	0,00343	0,00214	0,00557
5	Сосна	6	30x30x120	53,7	18200	0,00407	0,00295	0,00135	0,00430
6	Ялина	6	30x30x120	52,1	19100	0,00382	0,00273	0,00127	0,00400

Також проведемо окремий аналіз пружної та пластичної складової критичних деформацій, оскільки формула (2.9) дозволяє нам це зробити.

Отже, пружна складова критичних деформацій поверхнево обробленої деревини понесла наступні зміни в порівнянні з необробленою: для берези зменшилася на 24,6%; вільхи – на 33,7%; ясена – на 9,7%; модрини – на 27,1%; сосни – на 19,0%; ялини – на 11,0%.

А пластична складова для всіх досліджуваних композиційних матеріалів змінилася наступним чином: для берези практично не змінилася; вільхи збільшилась на 5,5%; ясена зменшилася на 11,8%; модрини також зросла на 8,9%; сосни залишилася на тій же відмітці; ялини також практично не змінилася.

Для критичних деформацій, які визначені експериментальним та теоретичним шляхом, відбувається характерне зменшення значень відносних деформацій. В той же час складові критичних деформацій функції (2.9) змінюється по різному: пружна – зменшується, а пластична – залишається на тих же позначках з незначним відхиленням в ту чи іншу сторону.

Проведемо статистичний аналіз отриманих експериментальних та теоретичних результатів досліджень за всіма 36-ма композиційними зразками (рис.5.18), (табл.5.11).

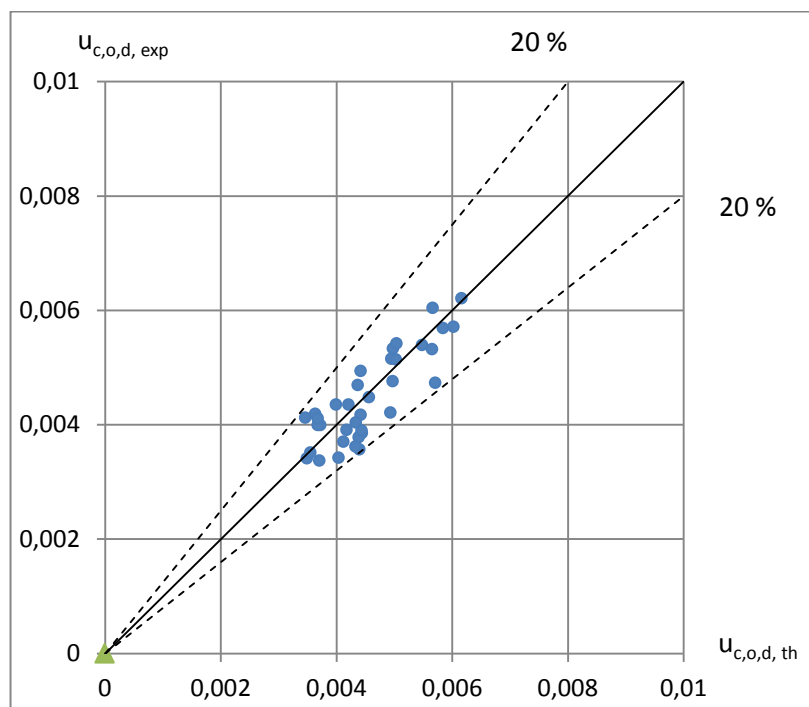


Рис.5.18. Відхилення експериментальних значень критичних деформацій від теоретичних за формулою автора (2.9) композиційних матеріалів на основі деревини та полімерної композиції «силор» за поверхневої модифікації

Таблиця 5.11

Статистична оцінка формули автора (2.9) з визначення критичних деформацій композиційного матеріалу на основі деревини та полімерної композиції «силор» листяних та хвойних порід за поверхневої модифікації

Формула для визначення критичних деформацій	Відхилення від експериментальних значень, %				
	$\Delta_{u,1}$	$\Delta_{u,2}$	Δ_u	σ_u	$\Delta_{u,max}$
$u_{c,0,d} = f_{c,0,d} / E_c + c_1 \cdot f_{c,0,d}^2$ <p>де $c_1 = 4,69 \cdot 10^{-7} \text{ (МПа)}^{-2}$</p>	-18,73	23,28	0,64	16,71	23,28
36 зразків. $\Delta_{u,1}$, $\Delta_{u,2}$ – нижня та верхня межі відхилень від експериментальних значень; Δ_u , σ_u – середньоарифметичні та стандартні значення цих відхилень; $\Delta_{u,max}$ – максимальне з $\Delta_{u,1}$ і $\Delta_{u,2}$.					

Отже, аналізуючи рис. 5.18 та табл.5.11 приходимо до висновку, що збіжність теоретичних та експериментальних значень критичних деформацій є задовільною незалежно від породи деревини композиційного матеріалу. Максимальна розбіжність складає $\Delta_{u,\max}=23,28\%$.

5.3.1.4. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c » модифікованої деревини

Для встановлення достовірності запропонованої функції (2.5) проведемо апроксимацію діаграм механічного стану всіх композиційних матеріалів за поверхневої модифікації для повних діаграм деформування. Для цього визначимо всі коефіцієнти поліному w_1, w_2, w_3, w_4 в табличній формі (табл.5.12).

Таблиця 5.12

Результати апроксимації дійсних (повних) діаграм композиційних матеріалів на основі деревини та полімерної композиції «силор» за поверхневої модифікації

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (2.5) та дослідних значень
	w_1	w_2	w_3	w_4	
Береза	17337,2	-4750,9	218,9	-2,2	0,961
Вільха	17686,6	-3617,7	-1291,9	20,9	0,935
Ясен	18948,9	-7069,4	486,3	-5,1	0,966
Модрина	17177,7	-5626,0	421,2	-4,8	0,979
Сосна	14849,1	9230,4	-11037,5	152,1	0,981
Ялина	19421,8	-6115,1	335,9	-3,8	0,949

Повні діаграми деревини побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) наведені на рис.5.19а – композиційного матеріалу на основі ясена, а на рис.5.19б – модрини.

Збіжність даних результатів є досить високою та знаходиться в межах $\eta=0,935\dots 0,981$ (Табл. 5.12).

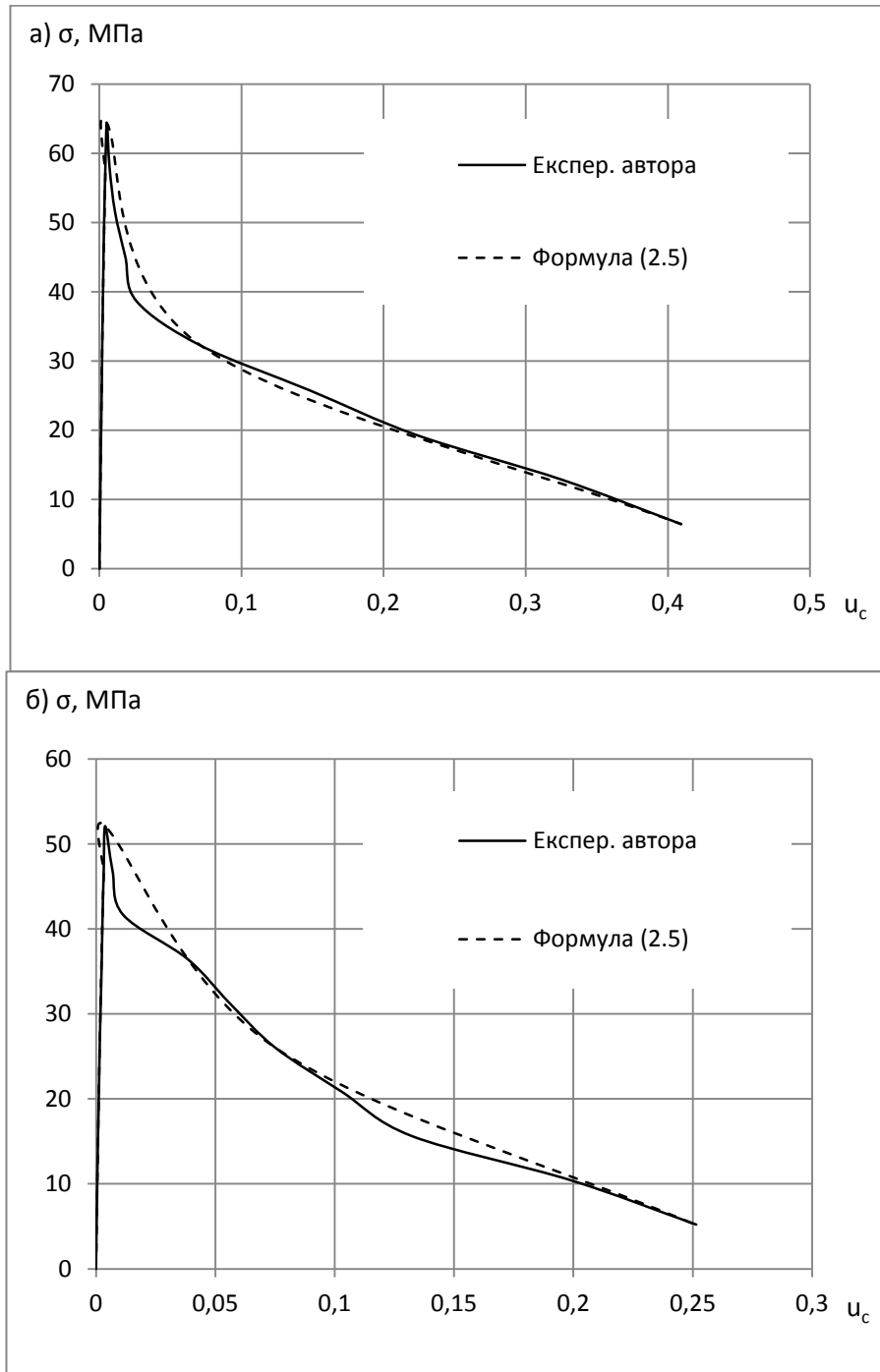


Рис.5.19. Повні діаграми композиційних матеріалів на основі деревини та полімерної композиції «силор» за поверхневої модифікації побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5) : а) ясена; б) ялини

Отже, функція (2.5) в повній мірі підходить для апроксимації повних діаграм деформування зразків конструкційних розмірів для такого виду модифікації.

5.3.2. Глибинна модифікація полімерною композицією «силор»

Призми-близнюки перерізом 30x30x120 мм всіх досліджуваних порід деревини були модифіковані полімерною композицією «силор» в автоклаві під тиском 2,5 атм. на протязі 2 год. Методика виготовлення зразків та опис процесу модифікації описано в розділі 2.

5.3.2.1. Побудова дійсних (повних) діаграм деформування «напруження σ_c – деформації u_c »

За результатами експерименту зразків композиційних матеріалів на основі листяних і хвойних порід та полімерної композиції «силор» за повздовжнього стику одноразовим короткочасним навантаженням побудовані дійсні (повні) діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » (рис.5.20а, рис.5.20б). Були визначені основні показники міцності та деформівності на всіх ділянках.

Аналіз будемо проводити в порівнянні з призмами композиційних матеріалів за поверхневої модифікації.

На першій ділянці (висхідна вітка діаграми) напруження і відносні деформації модифікованих матеріалів мали наступні показники (рис.5.20а, рис.5.20б): для зразків деревини берези перша ділянка закінчується напруженнями $\sigma_{cI} = 9,9$ МПа, які незначно збільшилось в порівнянні з деревиною за поверхневої модифікації, а відносні деформації були менші на 13,6% і досягли $u_{cI} = 0,00052$; вільхи напруження зафіксовані на відмітці $\sigma_{cI} = 8,2$ МПа та є більшими на 10,8%, в той час деформівність падає на 19,8% ($u_{cI} = 0,00036$); напруження призми глибинно модифікованого ясена стають

більшими на 18,3% ($\sigma_{cl} = 10,3$ МПа), деформівні характеристики залишаються практично незмінними $u_{cl} = 0,00044$.

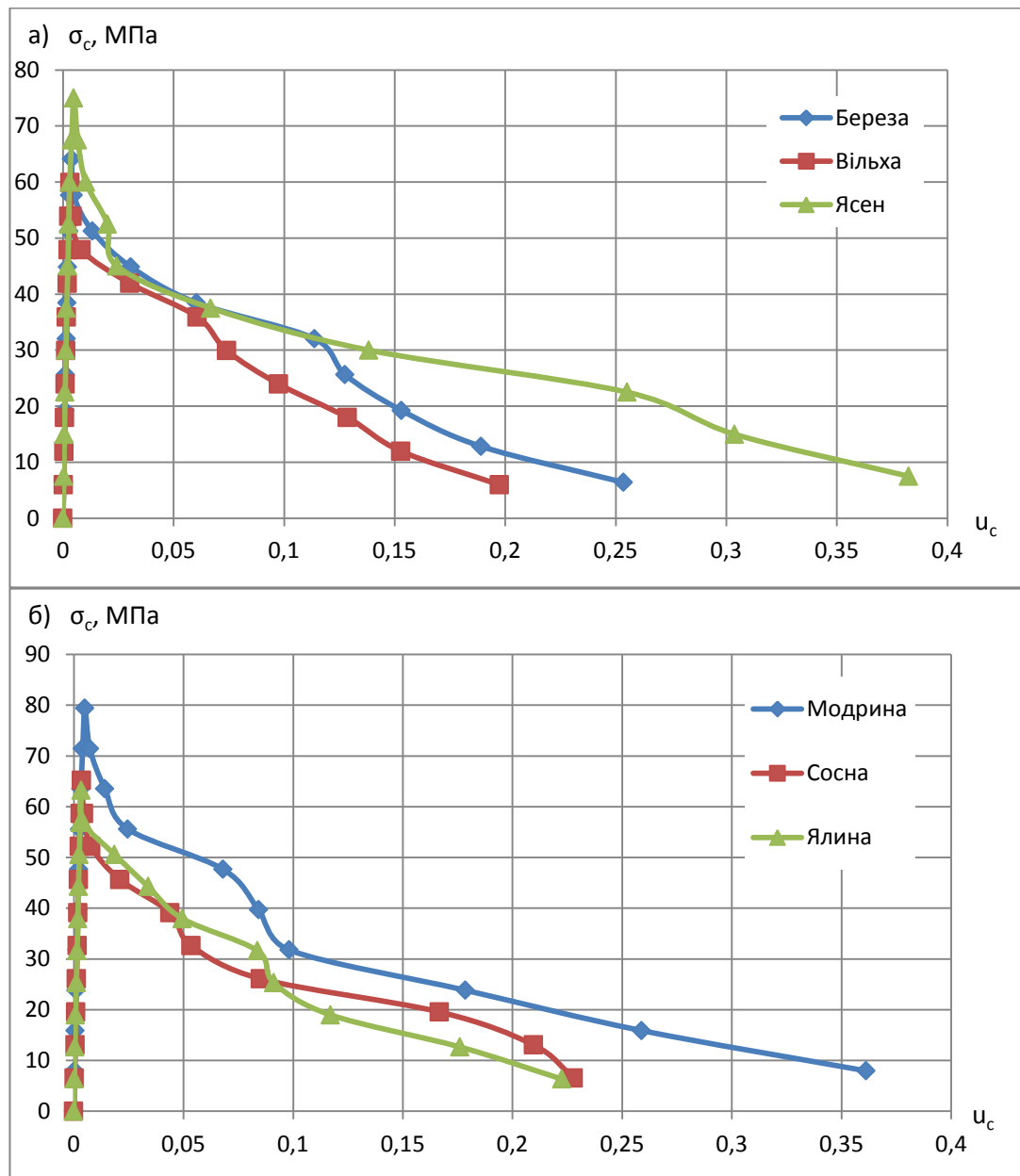


Рис.5.20. Дійсні (повні) діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » композиційних матеріалів на основі різних порід деревини та полімерної композиції «силор» за глибинної модифікації: а) листяних; б) хвойних

Для хвойних порід: модрина мінісні характеристики зростають на 14,9% та досягають позначки $\sigma_{cl} = 10,8$ МПа, а відносні поздовжні деформації падають на 26,9% ($u_{cl} = 0,00052$); сосни напруження збільшуються на 7,9% ($\sigma_{cl} = 9,6$ МПа),

деформівність стає меншою на 16,7% ($u_{c,l}=0,00048$); ялини міцність також зростає на 20,3% ($\sigma_{c,l}= 8,3$ МПа), відносні деформації падають на 22,9% ($u_{c,l}=0,00035$).

Таким чином, найбільші напруження, на даній ділянці, глибинно модифікованих листяних та хвойних порід збільшилась на 3-20%, а деформівність падає максимально на 27%.

Отже, для всіх композиційних матеріалів за глибинної модифікації верхня максимальна точки діаграми мала наступні показники (рис.5.20а, Рис.5.20б): для деревини берези межа міцності склала $f_{c,0,d}=64,1$ МПа (більше на 18,9% порівняно з деревиною берези обробленої поверхнево), критичні деформації досягли рівня – $u_{c,0,d,exp}=0,00395$ (менше на 6,6%); межа міцності модифікованої вільхи – $f_{c,0,d}=59,9$ МПа (більше на 21,3%), а відносні деформації були на рівні - $u_{c,0,d,exp}=0,00321$ (менше на 20,2%); ясена мала межу міцності – $f_{c,0,d}=75,0$ МПа (більше на 16,5%), критичні деформації – $u_{c,0,d,exp}=0,00488$ (менше на 6,8%); модрина максимальні напруження досягли похначки $f_{c,0,d}=79,4$ МПа (більше на 17,6%), відносні деформації (критичні) – $u_{c,0,d,exp}=0,00504$ (менше на 11,9%); сосни – $f_{c,0,d}=65,2$ МПа (більше на 21,4%), критичні деформації $u_{c,0,d,exp}=0,00356$ (менше на 14,3%); ялина тимчасова міцність стала на рівні $f_{c,0,d}=63,2$ МПа (більше на 21,3%), деформівні показники – $u_{c,0,d,exp}=0,00338$ (менше на 13,0%).

Отже, тимчасова гранична міцність глибинно модифікованих матеріалів полімерною композицією «силор» збільшується від 17% до 21%, а деформівність при цьому є меншою на 7–20% в порівнянні з деревиною тих же порід модифікованих поверхнево.

На третій ділянці граничні деформації модифікованої деревини листяних та хвойних порід будемо знаходити таким же чином, як і для клесної та поверхнево модифікованої деревини, за формулами (3.1–3.6). Отже, граничні деформації на кінець даної ділянки мали такі показники: для деревини берези $u_{c,u}=0,00577$ (менше на 11,8%); вільхи – $u_{c,u}=0,00473$ (менше на 12,1%); ясена – $u_{c,u}=0,00711$ (менше на 21,6%); модрина – $u_{c,u}=0,00632$ (менше на 20,7%); сосни – $u_{c,u}=0,00542$ (менше на 9,4%); ялини – $u_{c,u}=0,00498$ (менше на 12,4%).

Таким чином, деформівні показники на третій ділянці, зменшуються на 9,4–21,6% в порівнянні зі значеннями призм за поверхневої модифікації.

На четвертій ділянці наведемо тільки накопичення остаточних відносних деформацій за напружень $\sigma_{c,fin}=0,1f_{c,0,d}$, оскільки далі відбувалося повне руйнування зразків, а потім їх повне розвантаження. Відносні остаточні деформації в глибинно модифікованій деревині також зменшувались, як і критичні деформації, і мали місце наступні значення: берези зменшились на 13,8% та досягли позначки $u_{c,fin}=0,2535$; вільхи – на 25,7% ($u_{c,fin}=0,1974$); ясена – на 7,0% ($u_{c,fin}=0,3825$); модрина – на 12,0% ($u_{c,fin}=0,3613$); сосни - на 28,1% ($u_{c,fin}=0,2278$); ялини – на 15,2% ($u_{c,fin}=0,2225$).

Таким чином, в зразках за глибинної модифікації, на всіх ділянках діаграм механічного стану, спостерігалось збільшення міцності та зменшення деформівності в порівнянні з композиційними матеріалами за поверхневої модифікації.

5.3.2.2. Початковий модуль пружності та модуль деформацій (січний) глибинно модифікованої деревини

На основі тих же експериментальних досліджень побудовані діаграми «модуль деформацій - рівень напружень» (рис.5.21а, рис.5.21б) та визначено початкові модулі пружності досліджуваних зразків модифікованої деревини, а також встановлені модулі деформацій протягом роботи призм в межах $(0,2...0,8)\eta$.

Таким чином були отримані наступні значення E_0 , які збільшились в порівнянні зі зразками композиційних матеріалів за поверхневої модифікації: берези $E_0=22500$ МПа (на 25,6%); вільхи $E_0=24500$ МПа (на 30,3%); ясена $E_0=26100$ МПа (на 32,5%); модрина $E_0=26500$ МПа (на 35,2%); сосни $E_0=22900$ МПа (на 25,8%); ялини $E_0=24900$ МПа (на 30,5%).

Аналізуючи отримані результати приходимо до висновку, що глибинна модифікація суттєво сприяє зростанню початкового модуля пружності на 26–35%.

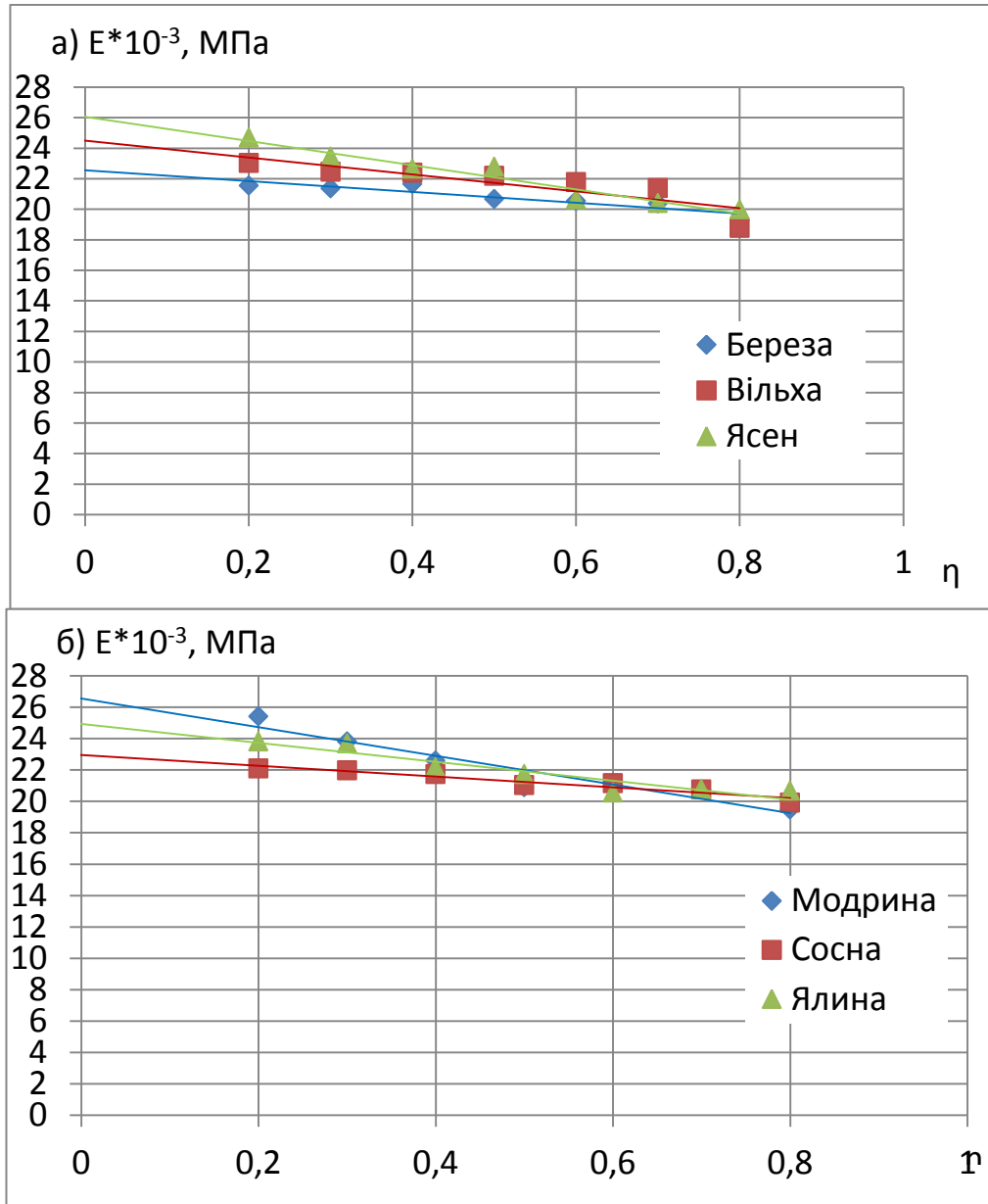


Рис.5.21. Діаграми « $E-\eta$ » (січний модуль – рівень напружень) композиційних матеріалів на основі різних порід деревини та полімерної композиції «силор» за глибинної модифікації: а) листяних; б) хвойних

Також визначимо зміну модуля деформацій від початкового модуля пружності до значень, що відповідають рівню напружень $\eta=0,8$ (рис.5.21а,

рис.5.21б): для деревини берези зменшується на 13,6%; вільхи – на 21,9%; ясена – на 31,8%; модрина – на 38,0%; сосни – на 14,5%; ялини – на 23,9%.

Отже, для композиційних матеріалів на основі листяних та хвойних порід модуль деформацій змінюється в діапазоні 14...38%.

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії глибинно модифікованої деревини полімерною композицією «силор» наведено в табл.5.13.

Таблиця 5.13

Основні параметри і статистики кореляційних рівнянь регресії глибинно модифікованої деревини полімерною композицією «силор»

Назва зразка	Кореляційне рівняння	r	m _r	r/m _r	V, %
БСМ-Г	$E' = 22,549 \cdot (1 - 0,055 \cdot \eta)$	0,913	0,063	15	1,54
ВСМ-Г	$E' = 24,487 \cdot (1 - 0,092 \eta)$	0,858	0,100	9	3,21
ЯсСМ-Г	$E' = 26,051 \cdot (1 - 0,106 \cdot \eta)$	0,968	0,024	41	1,88
МСМ-Г	$E' = 26,544 \cdot (1 - 0,115 \cdot \eta)$	0,957	0,032	30	2,49
ССМ-Г	$E' = 22,945 \cdot (1 - 0,053 \cdot \eta)$	0,959	0,030	32	0,97
ЯлСМ-Г	$E' = 24,928 \cdot (1 - 0,095 \cdot \eta)$	0,937	0,046	20	2,08

5.3.2.3. Критичні деформації

Визначаємо критичні деформації $u_{c,0,d,exp}$ всіх досліджуваних зразків за діаграмами деформування (рис.5.20а, рис.5.20б). Усереднені їх значення показані в табл.5.14.

Критичні деформації композиційних матеріалів на основі листяних та хвойних порід та полімерної композиції «силор» $u_{c,0,d,th}$ знаходимо теоретичним шляхом за формулою (2.9) (табл.5.14). При цьому коефіцієнт складає

$c_1 = 2,55 \cdot 10^{-7} \text{ (МПа)}^{-2}$ для зразків за глибинної модифікації. Також визначені пружна $u_{c,el,th}$ та пластична $u_{c,pl,th}$ складові.

Таким чином значення критичних деформацій, визначених за формулою (2.9), зменшилися в порівнянні з призмами, які отримані за поверхневої модифікації: берези на 12,1%; вільхи на 11,9%; ясена на 21,6%; модрина на 20,8%; сосни на 9,4%; ялини на 12,4%.

Таблиця 5.14

Значення експериментальних та теоретичних показників усереднених критичних деформацій композиційних матеріалів на основі деревини та полімерної композиції «СИЛОР» за глибинної модифікації

№п/п	Порода деревини	К-сть призм шт.	Переріз зразків, мм	$f_{c,0,d}$ МПа	E_0 , МПа	$u_{c,0,d,exp}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,0,d,th}$
1	Береза	6	30x30x120	64,1	22500	0,00395	0,00285	0,00105	0,00390
2	Вільха	6	30x30x120	59,9	24500	0,00321	0,00244	0,00092	0,00336
3	Ясен	6	30x30x120	75	26100	0,00488	0,00287	0,00143	0,00431
4	Модрина	6	30x30x120	79,4	26500	0,00504	0,00300	0,00161	0,00461
5	Сосна	6	30x30x120	65,2	22900	0,00356	0,00285	0,00108	0,00393
6	Ялина	6	30x30x120	63,2	24900	0,00338	0,00254	0,00102	0,00356

Також проведемо окремий аналіз пружної та пластичної складової критичних деформацій.

Отже, пружна складова критичних деформацій понесла наступні зміни: для берези стала меншою на 5,6%; вільхи – на 7,0%; ясена – на 14,6%; модрина – на 14,3%; сосни – на 3,5%; ялини – на 7,5%.

А пластична складова в цілому зменшилася для всіх досліджуваних порід композиційних матеріалів на основі деревини та полімерної композиції «силор» за глибинної модифікації: для берези на 29,5%; вільхи на 46,7%; ясена на 36,4%; модрина на 32,9%; сосни на 25,0%; ялини на 24,5%.

Для критичних відносних деформацій, які визначені теоретичним шляхом, відбувається характерне зменшення значень в порівнянні з призмами за поверхневої модифікації в інтервалі 9–22%. В той же час складові відносних критичних деформацій функції (2.9) зменшуються, але по різному: пружна складова в інтервалі 4–15%, а пластична суттєво в межах 25–47%.

Проведемо статистичний аналіз отриманих експериментальних та теоретичних результатів досліджень за всіма 36-ма зразками композиційних матеріалів на основі хвойних та листяних порід за глибинної модифікації (Рис.5.22), (Табл.5.15).

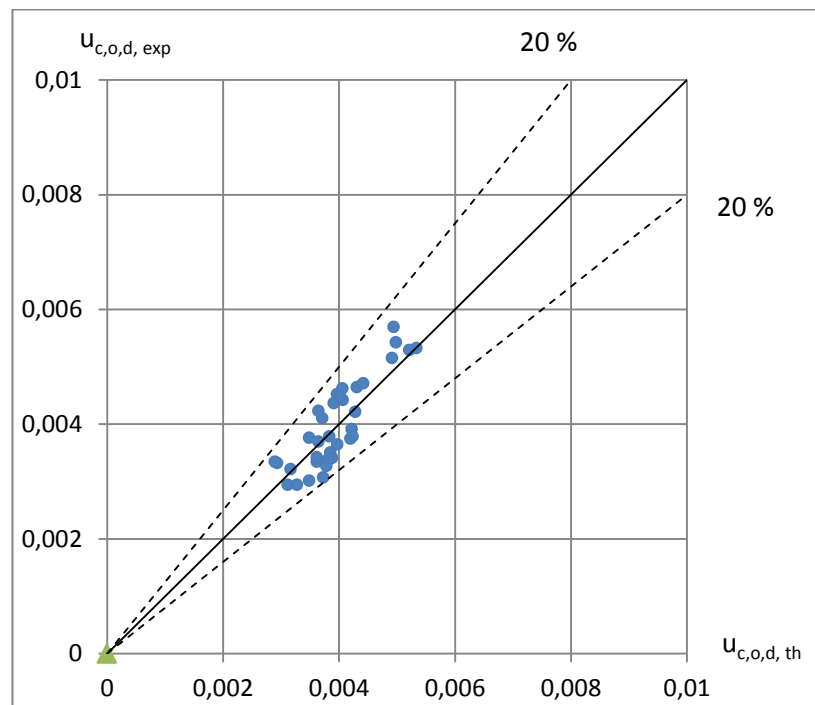


Рис.5.22. Відхилення експериментальних значень критичних деформацій від теоретичних за формулою автора (2.9) композиційних матеріалів на основі деревини та полімерної композиції «силор» за глибинної модифікації

Статистична оцінка формули автора (2.9) з визначення критичних деформацій композиційного матеріалу на основі деревини та полімерної композиції «силор» за глибинної модифікації

Формула для визначення критичних деформацій	Відхилення від експериментальних значень, %				
	$\Delta_{u,1}$	$\Delta_{u,2}$	Δ_u	σ_u	$\Delta_{u,max}$
$u_{c,0,d} = f_{c,0,d} / E_c + c_1 \cdot f_{c,0,d}^2$, де $c_1 = 2,55 \cdot 10^{-7} \text{ (МПа)}^{-2}$	-16,75	21,49	0,43	11,82	21,49
36 зразків. $\Delta_{u,1}$, $\Delta_{u,2}$ – нижня та верхня межі відхилень від експериментальних значень; Δ_u , σ_u – середньоарифметичні та стандартні значення цих відхилень; $\Delta_{u,max}$ – максимальне з $\Delta_{u,1}$ і $\Delta_{u,2}$.					

Отже, аналізуючи рис.5.22 та табл.5.15 приходимо до висновку, що збіжність теоретичних та експериментальних значень критичних деформацій є задовільною незалежно від породи деревини. Максимальна розбіжність складає $\Delta_{u,max}=21,49\%$.

5.3.2.4. Апроксимація діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c »

Перевіряємо адекватність залежності (2.5) всіх зразків композиційних матеріалів за глибинної модифікації через апроксимацію діаграм механічного стану «напруження σ_c – деформації u_c » для повних діаграм. Для цього визначимо всі коефіцієнти поліному w_1, w_2, w_3, w_4 та заносимо в табл. 5.16.

Повні діаграми деформування модифікованої деревини за глибинної модифікації побудовані за експериментальними значеннями автора та за функцією (2.5) на основі вільхи наведені на рис.5.23а, а сосни – на рис.5.23б.

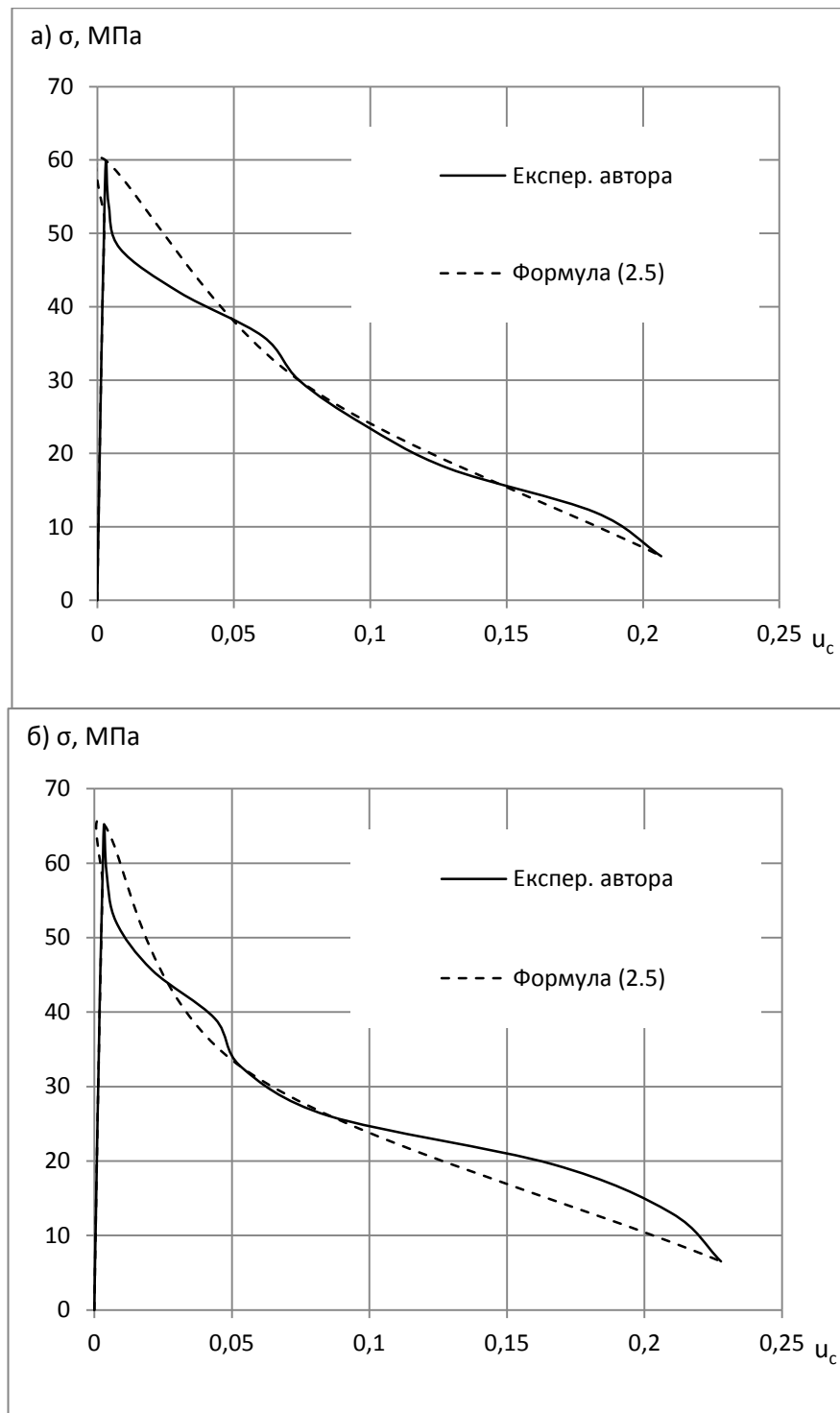


Рис.5.23. Повні діаграми композиційних матеріалів на основі деревини та полімерної композиції «силор» за глибинної модифікації побудовані за експериментальними значеннями та за функцією (2.5): а) вільхи; б) сосни

Отже, функція (2.5) в повній мірі підходить для апроксимації дійсних (повних) діаграм деформування зразків композиційних матеріалів на основі деревини та полімерної композиції «силор» за глибинної модифікації.

Результати апроксимації дійсних (повних) діаграм композиційних матеріалів на основі деревини та полімерної композиції «силор» за глибинної модифікації

Породи деревини	Коефіцієнти поліному				Збіжність теоретичних за функцією (3.5) та дослідних значень η
	w_1	w_2	w_3	w_4	
Береза	23688,9	-7813,8	356,7	-3,9	0,974
Вільха	24874,4	-6526,6	316,1	-3,4	0,970
Ясен	26781,2	-12287,9	884,9	-9,3	0,982
Модрина	24211,6	-9006,9	555,3	-6,1	0,969
Сосна	23256,9	-5240,1	301,3	-3,5	0,953
Ялина	24229,3	-5790,9	262,7	-2,7	0,958

5.3.3. Поліпшення міцнісних та деформівних властивостей композиційних матеріалів на основі суцільної деревини та полімерної композиції «силор»

Третій спосіб, який ми застосували, для поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини – це поверхнева та глибинна модифікація полімерною композицією «силор». Наведемо покращення даних параметрів на основі дійсних діаграм деформування, зокрема максимального напруження, критичних деформацій, початкового модуля пружності та інших, внаслідок утворення нових композиційних матеріалів, за допомогою графіків.

Тобто для наочності наших результатів побудуємо гістограми для кожного важливого параметру діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » та тих показників, які ми отримали теоретичним шляхом.

За результатами експерименту побудуємо гістограму зміни усереднених максимальних напружень від впливу поверхневої та глибинної модифікації для всіх досліджуваних порід деревини (рис.5.24).

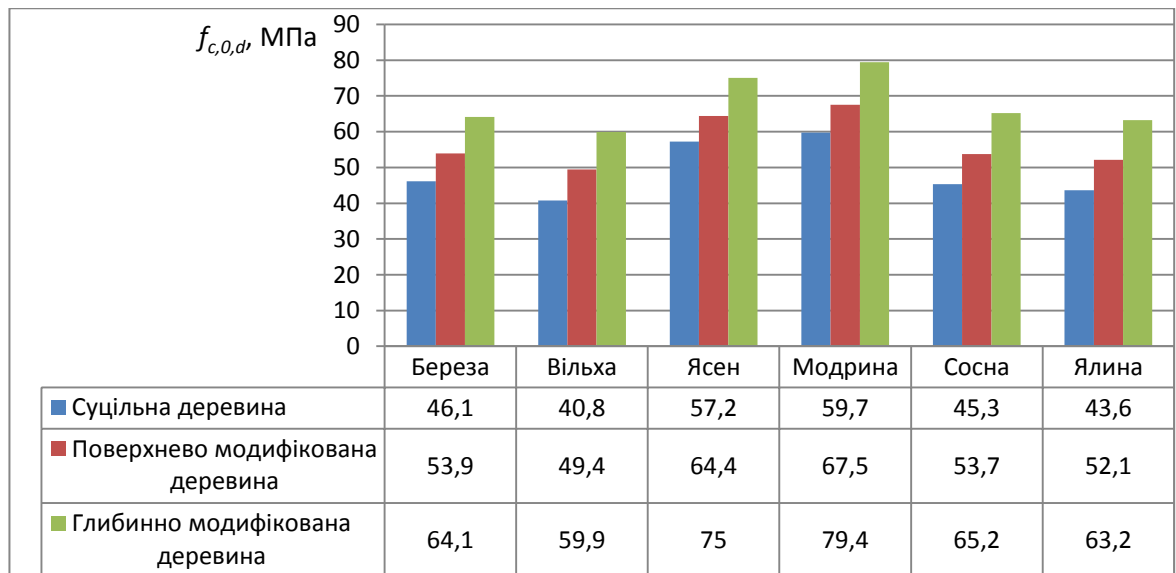


Рис.5.24. Динаміка зміни міцності композиційних матеріалів на основі суцільної деревини та полімерної композиції «силор»

Отже, внаслідок модифікації призм конструкційних розмірів міцність деревини збільшується для композиційних матеріалів на основі деревини берези на 39,1%, вільхи – на 46,8%, ясеня - на 31,1%, модрина – на 33,0%, сосни – на 43,9%, ялини – на 45,0%.

Гістограма зміни критичних деформацій визначених експериментальним шляхом від впливу просочення полімерною композицією «силор» показана на рис. 5.25.

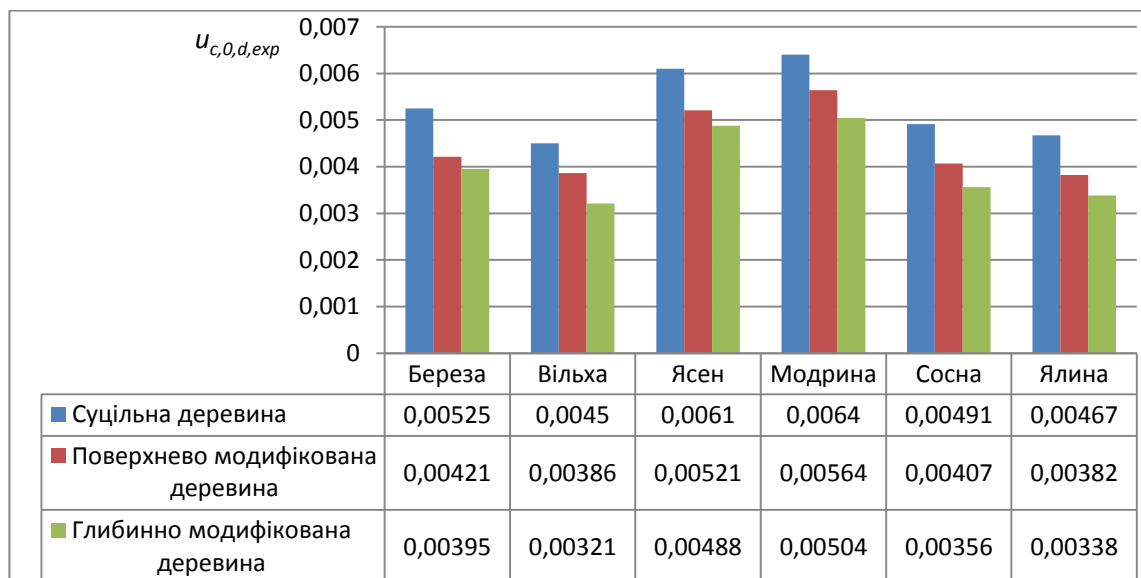


Рис.5.25. Динаміка зміни критичних деформацій $u_{c,0,d,exp}$ композиційних матеріалів на основі суцільної деревини та полімерної композиції «силор»

Таким чином, внаслідок модифікації суцільної деревини критичні деформації зменшились для зразків: берези – на 32,9%, вільхи – на 40,2%, ясена – на 25,0%, модрина – на 27,0%, сосни – на 37,9%, ялини – на 38,1% в порівнянні з суцільною деревиною вологістю 12% віком 60 років.

Зміна граничних деформацій показана на рис.5.26.

Отже, за рахунок модифікації призм деревини граничні деформації зменшились для композиційних матеріалів: берези – на 34,8%, вільхи – на 34,0%, ясена – 41,8%, модрина – 38,3%, сосни – на 25,3%, ялини – на 30,3%.

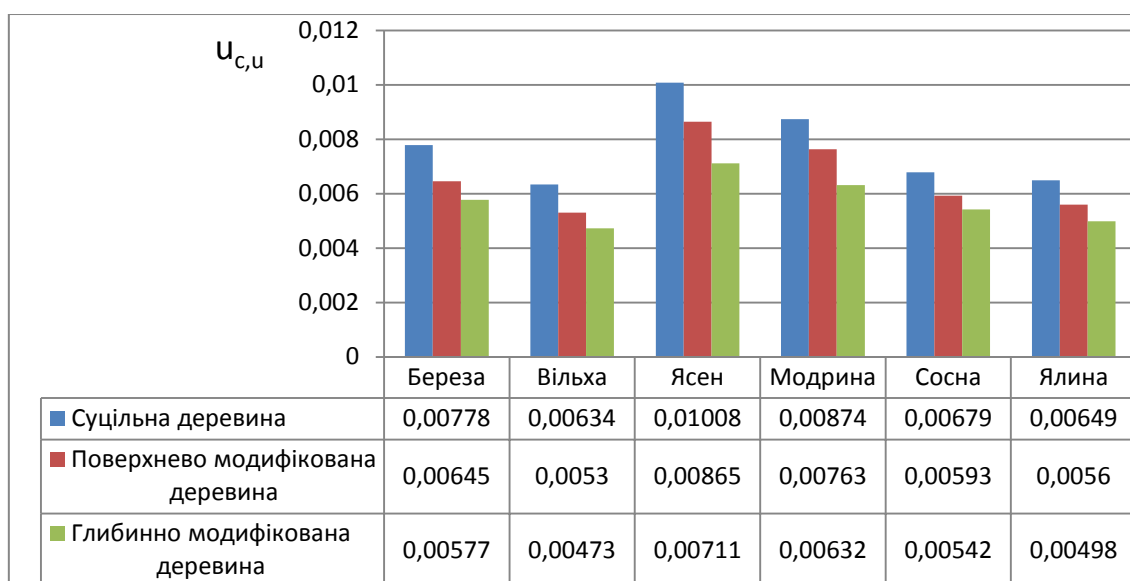


Рис.5.26. Динаміка зміни граничних деформацій $u_{c,u}$ композиційних матеріалів на основі суцільної деревини та полімерної композиції «силор»

Динаміка зміни початкового модуля пружності композиційних матеріалів на основі суцільної деревини від впливу поверхневої та глибинної модифікації наведено на рис. 5.27.

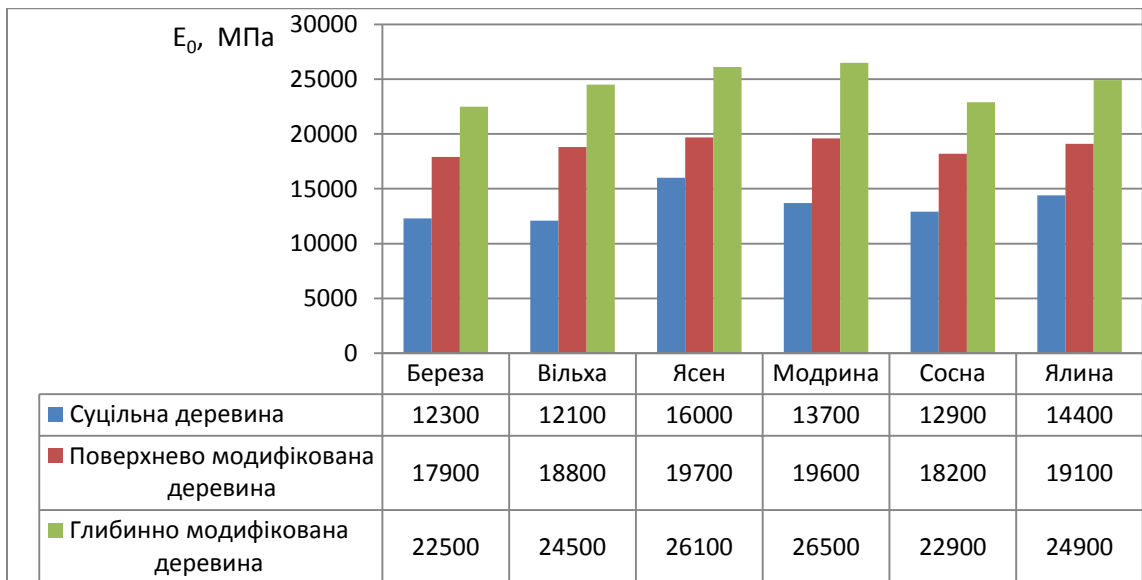


Рис.5.27. Динаміка зміни початкових модулів пружності композиційних матеріалів на основі суцільної деревини та полімерної композиції «силор»

Отже, внаслідок просочення полімерної композиції в тіло деревини початковий модуль пружності збільшився для призм: берези – на 82,9%, вільхи – на 102,5%, ясеня – на 63,1%, модрина – на 93,4%, сосни – на 77,5%, ялини – на 72,9%.

Таким чином внаслідок модифікації основні міцнісні та деформівні показники значно поліпшуються, зокрема міцність стає більшою на 31–47%; критичні деформації зменшуються на 25–40%, граничні деформації спадають на 25–42%, початковий модуль пружності збільшується на 63-103%.

Виявлено, що такі зміни відбуваються внаслідок просочення полімерної композиції в тіло суцільної деревини та формування полімеру в порах деревини – трахеїдах, капілярах і променевих клітинах. Отриманий полімер може допомогти уникнути потенційного пошкодження вилуженими консервантами обробленої деревини з навколишнього середовища, уникнути просторової деформації стиснутої деревини і зміни її кольору, що не дають змогу отримати традиційні методи підсилення.

Також встановлено, що чим глибше просочується деревина, тим краще поліпшуються основні показники.

5.4. Висновки до п'ятого розділу

1. Вперше проведено широкомасштабні конструктивні експериментально-теоретичні дослідження міцнісних та деформівних характеристики клеєної та модифікованої деревини листяних (берези, вільхи, ясена) та хвойних (модрини, сосни, ялини) порід на стиск вздовж волокон за жорсткого прикладання навантаження та побудовано повні діаграми «напруження σ_c – деформації u_c » від початку завантаження і до руйнування (висхідна та спадна вітки).

2. Отримано новий композиційний матеріал на основі деревини (суцільної або клеєної) та полімерної композиції «силор» за поверхневої та глибинної модифікації.

3. Встановлено оптимальний час просочення полімерної композиції «силор» в тіло деревини за поверхневої модифікації - 12 год, глибинної – 2 год.

4. За поверхневої модифікації клеєної деревини міцність збільшується на 19% в порівнянні зі зразками простої клеєної; початкові модулі пружності збільшуються на 21%; відносні деформації новоутворених композиційних матеріалів зменшуються: вздовж волокон на 22%; поперечні - перпендикулярні до клеєвого шва на 27%; поперечні паралельні клеєвому шву на 45%.

5. За поверхневої модифікації суцільної деревини листяних та хвойних порід максимальні напруження збільшуються на 12–22% в порівнянні із суцільною деревиною вологістю 12% віком 60 років. Деформівність зменшується в межах 14–35 %. В той же час складові критичних деформацій функції (2.9) змінюється по різному: пружна – зменшується, а пластична – залишається на тих же позначках з незначними відхиленнями в ту чи іншу сторону. Початковий модуль пружності досліджуваних зразків є більшим на 23–55%.

6. Тимчасова гранична міцність глибинно модифікованих матеріалів полімерною композицією «силор» збільшується в межах 17–21%, деформівність (критичні відносні деформації) при цьому стають меншими на 7–

20%, а початковий модуль пружності суттєво зростає на 26–35% в порівнянні з деревиною тих же порід модифікованих поверхнево.

7. Середнє значення межі міцності клейових з'єднань на зсув вздовж волокон за одноразового навантаження становить 6,0 МПа, що більше мінімальних значень наведених в нормативній літературі. Руйнування зразків клейових з'єднань завжди проходило по деревині, що говорить про високу надійність клейового шва на резорциновому клеї.

8. Межа міцності зразків з клеєної деревини хвойних та листяних порід збільшується на 13–25%, а деформівність в ту чи іншу сторону несуттєво зростає або спадає. Початкові модулі пружності всіх досліджуваних порід клеєної деревини збільшилися в межах від 12,5 % (ялини) до 30,6% (вільхи).

9. Встановлено функцію полінома 4-го степеня для апроксимації повних діаграм деформування клеєної та модифікованої деревини.

10. Проведено детальний статистичний аналіз експериментально-теоретичних досліджень.

Матеріали розділу 5 наведені в наступних працях [43, 47, 48, 59-63, 65, 272, 274-276, 337, 338].

РОЗДІЛ 6

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ СУЦІЛЬНОЇ, КЛЕЄНОЇ ТА МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ

6.1. Напружено-деформований стан та основні рівняння рівноваги дерев'яного елемента

Дерев'яні колоди завжди мають форму близьку до круглої, а фізико-механічні характеристики, наприклад міцність деревини залежить від напрямку розташування волокон деревини, бо це обумовлено самою природою побудови дерева. Міцність деревини на повздовжній стиск і розтяг більша, ніж поперек за рахунок анізотропії. Саме ці міцнісні характеристики деревини і диктують умови її найкориснішого використання. Але найбільше деревина застосовується, як згинальний елемент в елементах та конструкціях, а також, як елемент, що працює на стиск або розтяг, згин з крученням, стиск зі згином, позацентровий стиск, позацентровий розтяг.

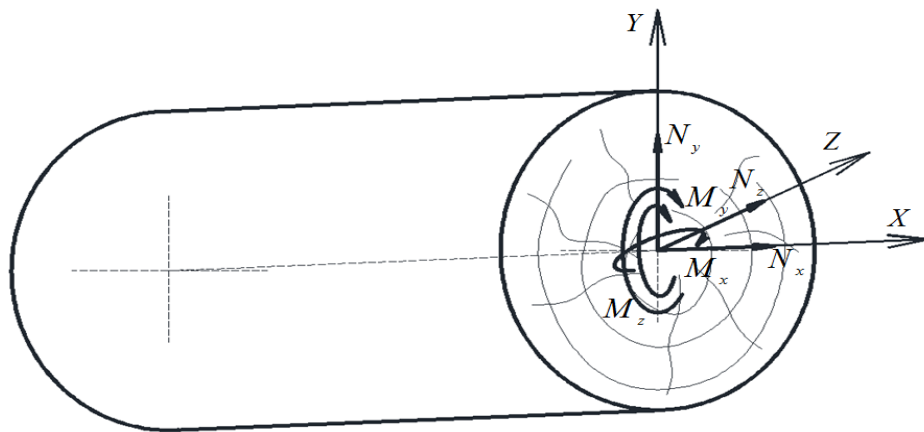


Рис 6.1 Внутрішні зусилля в дерев'яному елементі

До основних напружень, які виникають в дерев'яному елементі, прийнявши Декартову систему координат можна виділити 6 зусиль: N_x - зусилля стиску або розтягу вздовж волокон; N_y , N_z - зусилля стиску та розтягу

в напрямку поперек волокон, а саме в напрямку y та x ; M_x - крутний момент, що діє вздовж балки, який в практиці будівництва виникає дуже рідко; M_y, M_z - крутні моменти навколо поперечних осей y та x .

Система рівнянь рівноваги для поперечного перерізу дерев'яного елемента буде дорівнювати сумі всіх внутрішніх зусиль по осі x, y, z та сумі крутних моментів відносно цих же осей і матиме вигляд

$$\begin{cases} \sum N_x = 0; \sum N_y = 0; \sum N_z = 0; \\ \sum M_x = 0; \sum M_y = 0; \sum M_z = 0; \end{cases} \quad (6.1)$$

Проведемо аналіз роботи елементів, які найчастіше зустрічаються в будівництві. Слід виділити такі основні типи напружено-деформованих станів поперечного перерізу із зусиллями рівноваги в них:

1. Дерев'яний елемент, що працює на розтяг вздовж волокон та дерев'яний короткий елемент, що працює на стиск вздовж волокон. Система рівнянь для таких елементів, спроститься до одного рівняння рівноваги (6.1), а саме суми всіх внутрішніх та зовнішніх зусиль, що діють по осі x (6.2)

$$\sum N_x = 0; \quad (6.2)$$

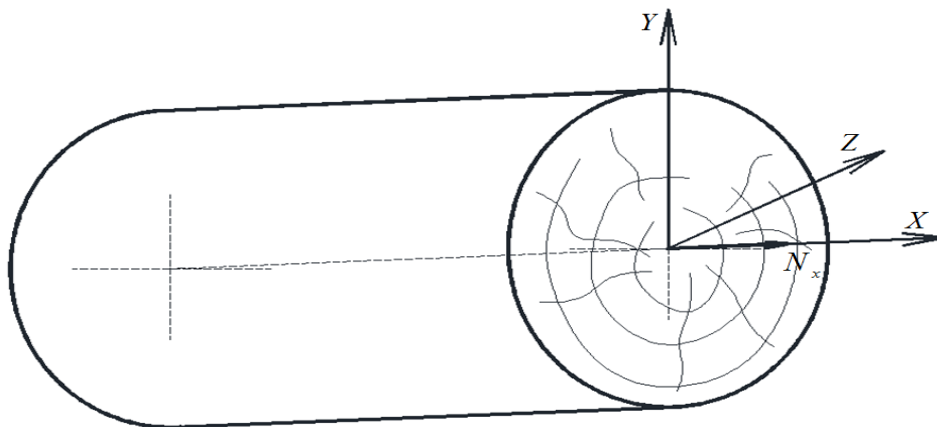


Рис 6.2 Внутрішні зусилля в дерев'яному елементі за розтягу та стиску

2. Згинальний дерев'яний елемент, дерев'яний довгий елемент, що працює на стиск, а також стиснуто-зігнутий, стиснуто-розтягнутий елемент

$$\begin{cases} \sum N_x = 0; \\ \sum M_z = 0; \end{cases} \quad (6.3)$$

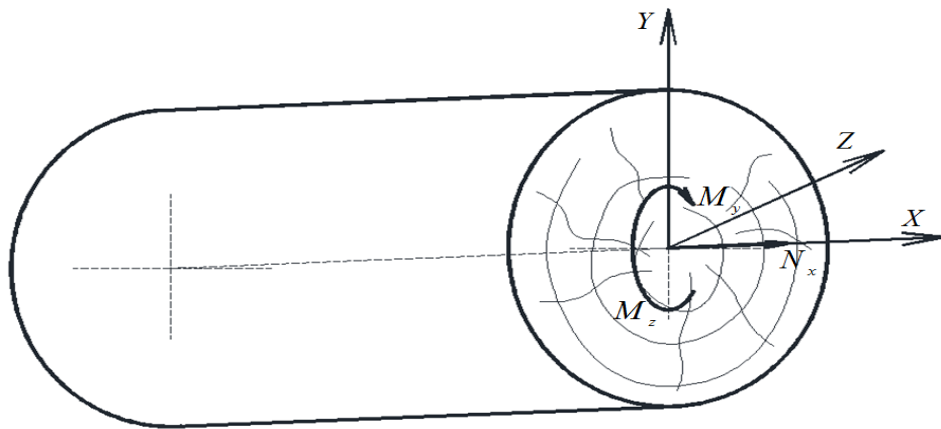


Рис 6.3. Внутрішні зусилля в дерев'яному елементі при стиску зі згином та розтягу зі згином

Розглянемо напружені стани від дії зовнішніх зусиль детальніше.

6.2. Напружено-деформований стан поперечного перерізу дерев'яного елемента, викликаний дією поздовжніх зусиль розтягу в дерев'яному елементі та короткому стиснутому, з використанням оптимізованої діаграми стиску та розтягу

Напружено-деформований стан, який виникає в поперечному перерізі при розтягу є досить простий, зображений на рис 6.4.

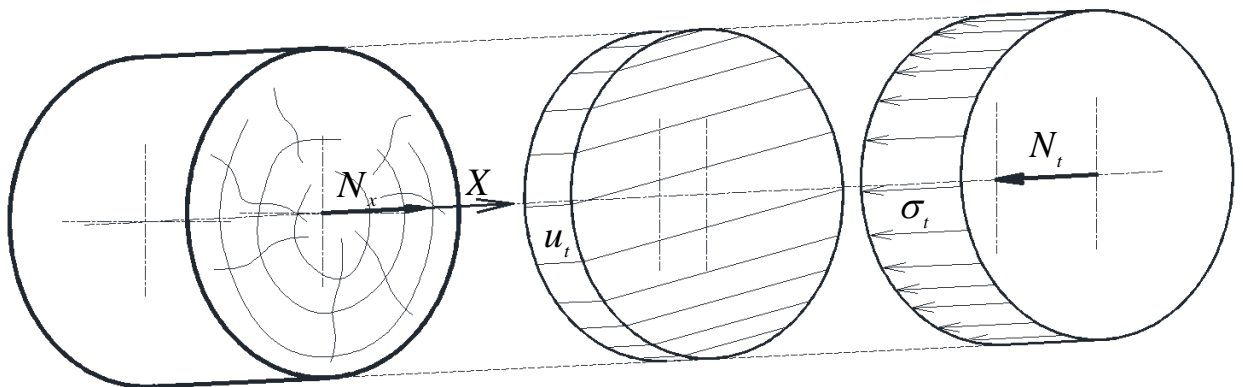


Рис. 6.4. Напружено-деформований стан розтягнутого дерев'яного елемента

Основне рівняння рівноваги (6.2) для даного елемента буде рівним

$$\sum N_x = N_x + N_t = 0; \quad \text{або} \quad N_x = N_t. \quad (6.4)$$

Зусилля N_t , які виникають в перерізі від дії зовнішнього N_x будуть визначатися за формулою (6.5)

$$N_t = \int f(u_t) dA; \quad (6.5)$$

Враховуючи, що зусилля розтягу можна визначити за формулою рівняння (6.5) прийме вигляд

$$N_t = E_t u_t A_t; \quad (6.6)$$

Тому рівновага перерізу для даного варіанту напружено-деформованого стану матиме вигляд

$$N_x = E_t u_t A_t; \quad (6.7)$$

Якщо підставити граничні деформації $u_{t,u}$, які може сприйняти розтягнутий переріз, ми отримаємо максимальне зусилля, що може сприйняти даний переріз

$$N_x = E_t u_{t,u} A_t; \quad (6.8)$$

Аналогічна ситуація буде властива і напружено-деформованому стану стиснутого короткого дерев'яного елемента (рис 6.5).

Основне рівняння рівноваги (6.2), як і для розтягнутого елемента буде рівним

$$\sum N_x = N_x + N_c = 0; \quad \text{або} \quad N_x = N_c. \quad (6.9)$$

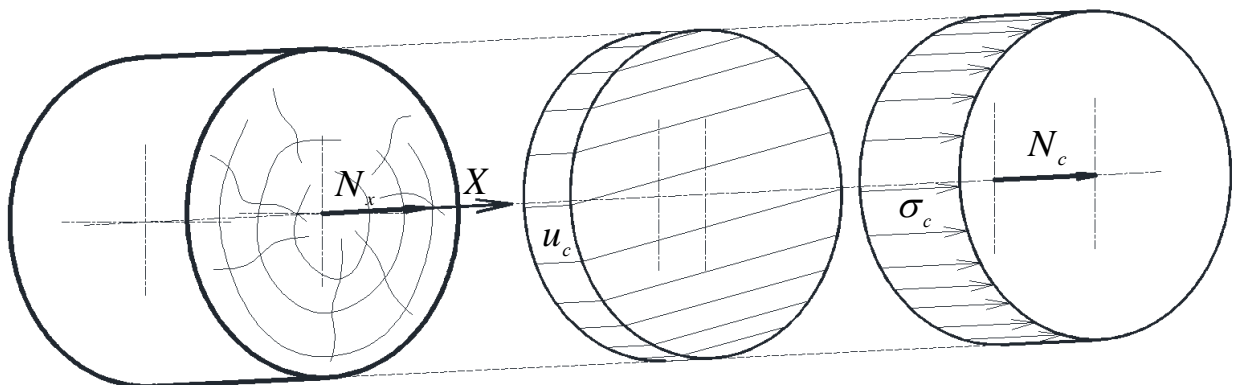


Рис. 6.5. Напружено-деформований стан стиснутого короткого дерев'яного елемента

Зусилля N_c , які виникають в перерізі від дії зовнішнього N_x будуть визначатися за формулою (6.5)

$$N_c = \int f(u_c) dA; \quad (6.10)$$

Враховуючи, що зусилля стиску можна визначити за формулою (6.11) рівняння (6.10) прийме вигляд

$$\sigma_c = f_c(u_c) = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} \quad (6.11)$$

$$N_c = A_c \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}; \quad (6.12)$$

Тому рівновага перерізу для даного варіанту напружено-деформованого стану матиме вигляд

$$N_x = A_c \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u^{i-1}}; \quad (6.13)$$

Якщо підставити граничні деформації $u_{c,u}$, які може сприйняти розрахунковий переріз розтягнутого елемента, ми отримаємо максимальне зусилля, що може сприйняти даний переріз

$$N_x = A_c \sum_{i=1}^4 w_i u_{c,u}^i; \quad (6.14)$$

6.3. Визначення напружено-деформованого стану поперечного перерізу згинального елемента з використанням оптимізованої діаграми стиску та розтягу

В чинних нормах проектування дерев'яних елементів та конструкцій в розрахунковій моделі поперечного перерізу при визначенні його міцності, у стиснутій та розтягнутій зонах згинального елемента, прийнята трикутна епюра напружень, яку, в силу деяких причин, можна вважати умовною. Згідно з трикутною епюрою напружень, значення напруження на нейтральній лінії дорівнюють граничним значенням, що не відповідає дійсності. Крім цього, за

такої епюри висота стиснутої та розтягнутої зони згинального елемента та положення нейтральної лінії також не відповідають дійсному їх положенню. Уникнути цих недоліків можна шляхом використання оптимізованої діаграми напружень для всього перерізу, що в більшій мірі відповідає дійсній роботі матеріалів. Треба також зазначити, що прийняття трикутної епюри напружень у стиснутій та розтягнутій зоні дає можливість розглядати напружено-деформований стан перерізу тільки в граничному стані. Проте не дає можливості прослідкувати його зміни на різних стадіях навантаження елемента, через це немає змоги спрогнозувати роботу згинального елемента в цілому. Тому на даному етапі приймаються оптимізовані діаграми деформування, котрі описані в розділах 3, 4, і 5 та дають змогу якнайкраще представити роботу згинального елемента з деревини та композиційних матеріалів на її основі. Оптимізовані діаграми дають змогу створити деформаційну модель згинального елемента та визначити його напружено-деформований стан. Основними передумовами для створення деформаційної моделі згинального елемента з використанням деревини та матеріалів на основі деревини:

- всі необхідні рівняння рівноваги, які виникають у поперечному перерізі;
- деформування у поперечному перерізі відбувається за лінійним законом (тобто, зі збільшенням висоти – деформації збільшуються пропорційно);
- використання для стиснутої та розтягнутої зони функцій діаграм деформування, отриманих на основі експериментальних досліджень стиснутих та розтягнутих елементів.

Тому, враховуючи, прийняті передумови, оптимізовані діаграми деформування деревини та матеріалів на її основі є основним інструментом для деформаційної моделі. Що описують роботу матеріалів з врахуванням їх пружно-пластичної складової зображені на рис.6.6.

Для того, щоб проаналізувати роботу згинального дерев'яного елемента слід провести теоретичний аналіз його роботи, використовуючи сучасні методики розрахунку. Аналіз дерев'яного елемента слід провести в наступній послідовності:

1. Визначити міцність згинального дерев'яного елемента та визначити основні фактори, які впливають на міцність. А саме визначення згинального моменту, що може сприйняти поперечний переріз елемента та визначити фактори впливу на момент.

2. Розробити загальну методику визначення жорсткості елемента в цілому та провести детальний аналіз факторів, що впливають на жорсткість.

3. Розробити спрощені методику розрахунку для порівняння несучої здатності та жорсткості дерев'яних елементів.

Основними передумовами для розрахунку згинальних дерев'яних елементів і визначення моменту, який може сприймати елемент – це є функція залежності відносних деформацій від прикладеного навантаження. Зазвичай ці функції отримуються шляхом випробування деревини відповідно на стиск та розтяг за «м'яким» режимом прикладення навантаження. Ця методика не дає розуміння роботи деревини в цілому. Бо, по суті, в згинальному елементі деревина працює в стиснутій і розтягнутій зоні за жорсткого режиму, компенсуючи рівнодійну

$$u_c = f_c(\sigma_c) \quad (6.15)$$

$$u_t = f_t(\sigma_t) \quad (6.16)$$

Тому, для нашого теоретичного аналізу слід використовувати лише функції, які описують роботу деревини на стиск та розтяг тільки за «жорстким» режимом випробування. А саме, там, де визначалось навантаження, що сприймає дерев'яний зразок при певній відносній деформації. Тому для розрахунків використаємо довільні функції залежності зусиль від відносних деформацій (6.17), (6.18).

$$\sigma_c = f_c(u_c) \quad (6.17)$$

$$\sigma_t = f_t(u_t) \quad (6.18)$$

Ці функції можна апроксимувати в одну безперервну функцію (6.19).
Усереднений вигляд, якої зображений на рис.6.6

$$\sigma_w = f_w(u_w) \quad (6.19)$$

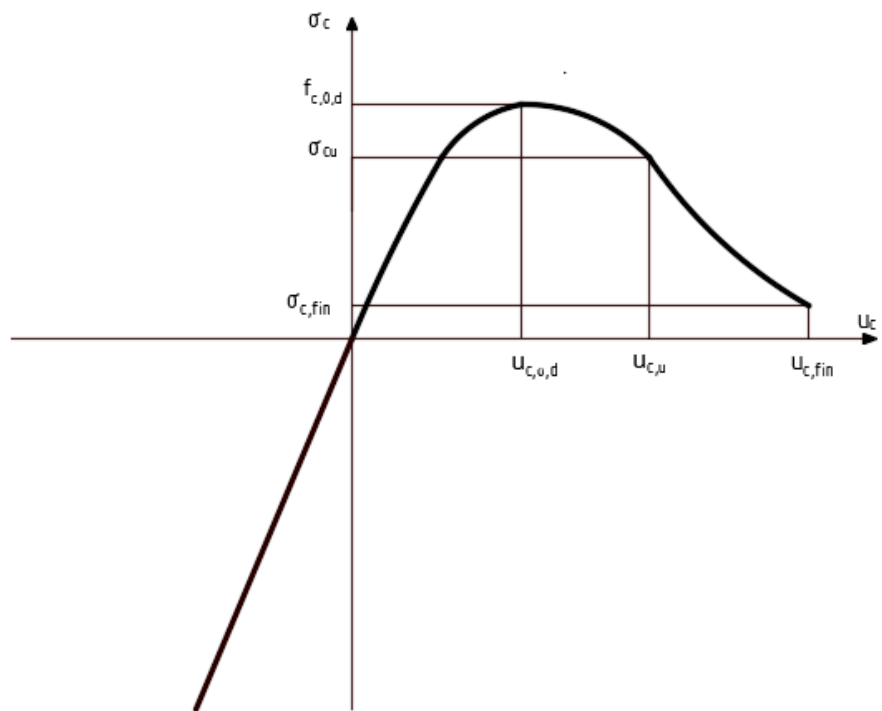


Рис. 6.6. Функція залежності напружень в деревині від відносних деформацій

Функція залежності напружень в деревині від відносних деформацій не є безперервною. Вона розпочинається в точці, де деревина зазнає розриву за розтягу та має точку екстремуму функції при навантаженні на стиск.

Запишемо загальні рівняння для окремого елемента зображеного на рис.6.7, на який діє згинальний момент. А це сума всіх внутрішніх та зовнішніх зусиль має дорівнювати нулю.

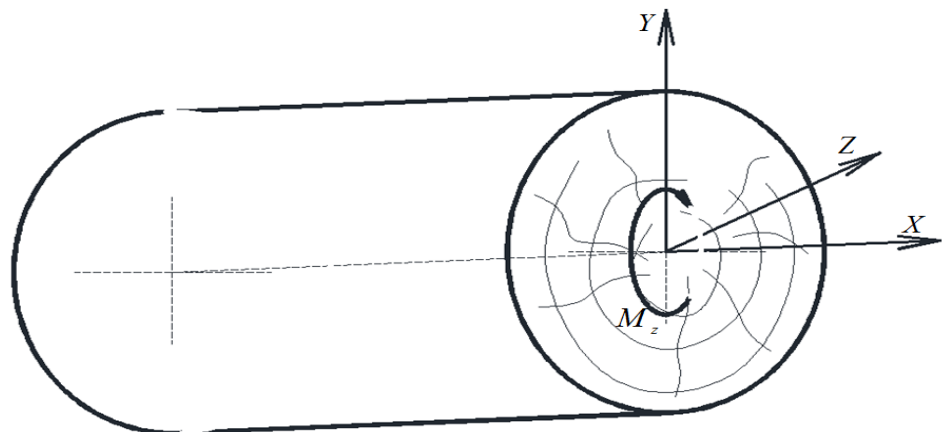


Рис.6.7. Внутрішні зусилля в дерев'яному елементі при згині

Для згинального елемента рівнодійну можна записати системою рівнянь

$$\begin{cases} \sum N_x = 0; \\ \sum M_z = 0; \end{cases} \quad (6.20)$$

Загальний вигляд рівноваги для згинального дерев'яного елемента зображений на рис 6.8.

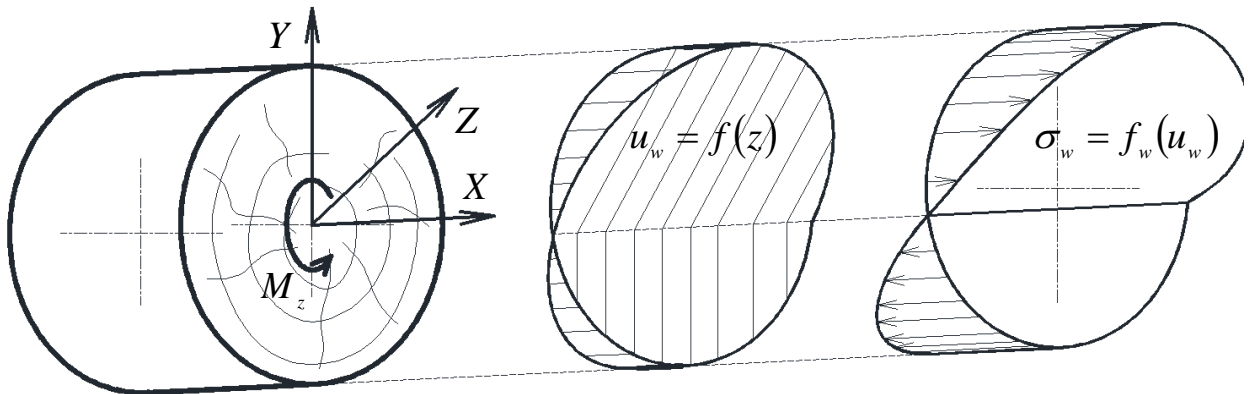


Рис. 6.8. Напружено-деформований стан зігнутого дерев'яного елемента

Враховуючи внутрішні напруження від дії зовнішнього моменту рівняння рівноваги (6.20) можна записати, як

$$\begin{cases} \int f_w(u_w) dA = 0; \\ \int f_w(u_w) z_w dA - M_z = 0. \end{cases} \quad (6.21)$$

Враховуючи, що поперечний переріз має змінну ширину перерізу, яка може задатися функцією від висоти перерізу, рівняння рівноваги (6.21) можна записати

$$\begin{cases} \int f_w(u_w) f_b(z) dz = 0; \\ \int f_w(u_w) z_w f_b(z) dz - M_z = 0. \end{cases} \quad (6.22)$$

де $b = f_b(z)$ - функція зміни ширини перерізу по висоті перерізу.

Щоб детально проаналізувати роботу деревини, слід задатися функцією самої роботи деревини. А для цього необхідно обрати функцію стану елемента.

Використаємо для розрахунку деревини функцію запропоновану автором для опису дійсних діаграм деформування на стиск рис 6.9. та розтяг рис.6.10., які мають вигляд

$$\sigma_c = f_c(u) = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}, \quad (6.23)$$

де σ_c - нормальні напруження стиску вздовж волокон;

u_c – відносна деформація, що відповідає напруженню σ_c ;

$u_{c,0,d}$ - деформація деревини, яка відповідає максимальній міцності $f_{c,0,d}$;

w_i - коефіцієнти функції;

i - кількість коефіцієнтів функції.

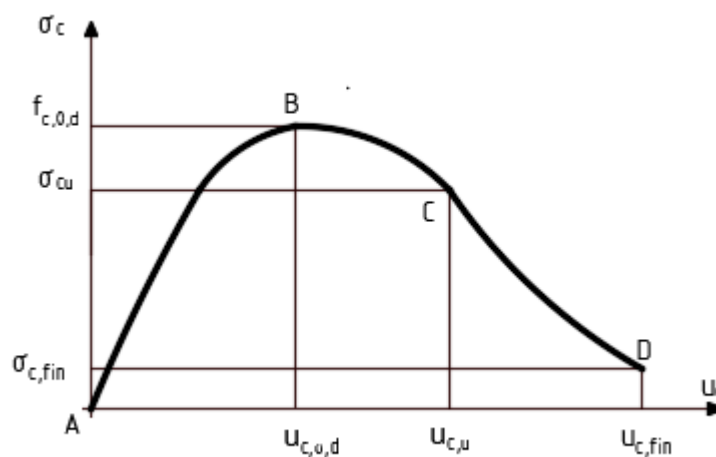


Рис.6.9. Дійсна (повна) діаграма деформування деревини стиску вздовж волокон побудована за функцією (6.23)

$$\sigma_t = f_t(u) = E_t \cdot u_t. \quad (6.24)$$

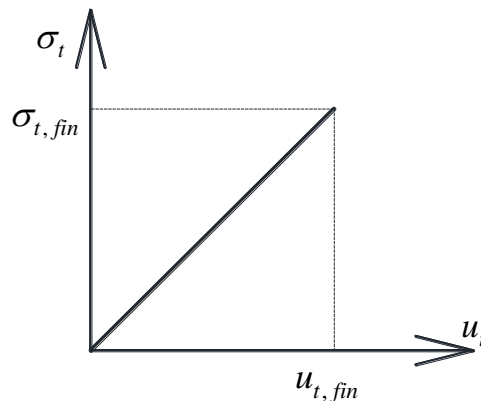


Рис. 6.10. Діаграма деформування деревини розтягу вздовж волокон, побудована за функцією (6.24)

Якщо прийняти, що поперечний переріз має довільну форму з використанням вище згаданих функцій та розділивши поперечний переріз на дві зони (стиснуту та розтягнуту) основні рівняння рівноваги будуть мати вигляд

$$\begin{cases} N_c - N_t = 0 \\ M_c + M_t - M_z = 0 \end{cases} \quad (6.25)$$

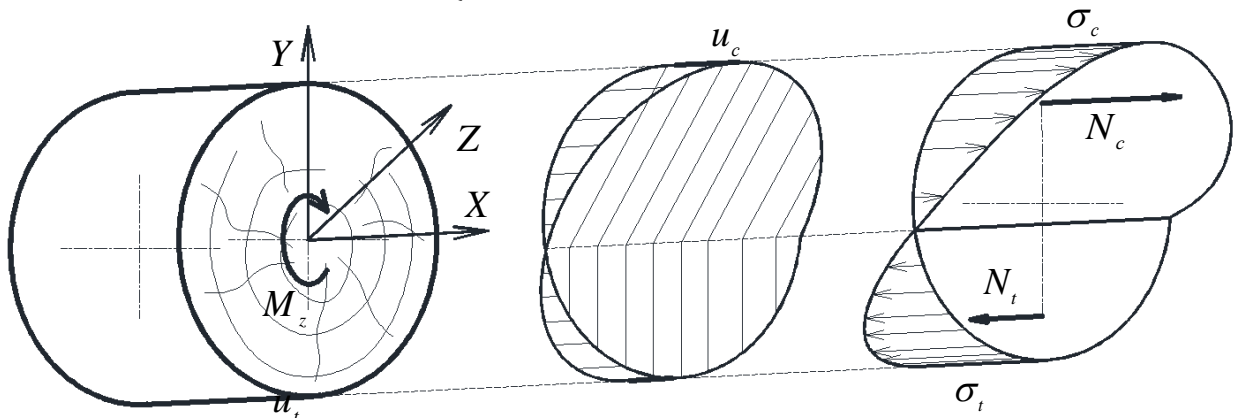


Рис. 6.11. Напружено-деформований стан зігнутого дерев'яного елемента

Розпишемо внутрішні зусилля з рівняння рівноваги (6.25), враховуючи межі інтегрування по висоті перерізу та функцію зміни ширини перерізу

$$N_c = \int_0^{z_c} f_c(u) \cdot f_b(z) dz; \quad (6.26)$$

$$N_t = \int_0^{z_t} f_t(u) \cdot f_b(z) dz. \quad (6.27)$$

$$M_c = \int_0^{z_c} f_c(u) \cdot f_b(z) \cdot z dz \quad (6.28)$$

$$M_t = \int_0^{z_t} f_t(u) \cdot f_b(z) \cdot z dz \quad (6.29)$$

Змінимо межі інтегрування для формул внутрішніх зусиль, що сприймає переріз враховуючи залежність (6.30) та (6.31)

$$dz = du \frac{z_c}{u_c} = du \frac{z_t}{u_t}; \quad (6.30)$$

$$z = u \frac{z_c}{u_c} = u \frac{z_t}{u_t}. \quad (6.31)$$

Внутрішні зусилля приймуть вигляд

$$N_c = \int_0^{u_c} f_c(u) \cdot f_b(u) \frac{z_c}{u_c} du; \quad (6.32)$$

$$N_t = \int_0^{u_t} f_t(u) \cdot f_b(u) \frac{z_t}{z_u} du; \quad (6.33)$$

$$M_c = \int_0^{u_c} f_c(u) \cdot f_b(u) \cdot \left(\frac{z_c}{u_c} \right)^2 \cdot u du; \quad (6.34)$$

$$M_t = \int_0^{u_t} f_t(u) \cdot f_b(u) \cdot \left(\frac{z_t}{u_t} \right)^2 \cdot u du. \quad (6.35)$$

Рівняння, отримані для визначення внутрішніх зусиль в перерізі довільної форми, можна застосовувати з різними функціями.

6.3.1. Окремий випадок визначення напружено-деформованого стану в прямокутному поперечному перерізі згинального дерев'яного елемента

Для визначення внутрішніх зусиль в поперечному перерізі прямокутної форми згинального елемента використаємо функції внутрішніх зусиль, враховуючи, що функція ширини по висоті перерізу буде рівна $f_b(z) = b = const$ ми отримаємо розрахунковий переріз, який зображений на рис.6.12.

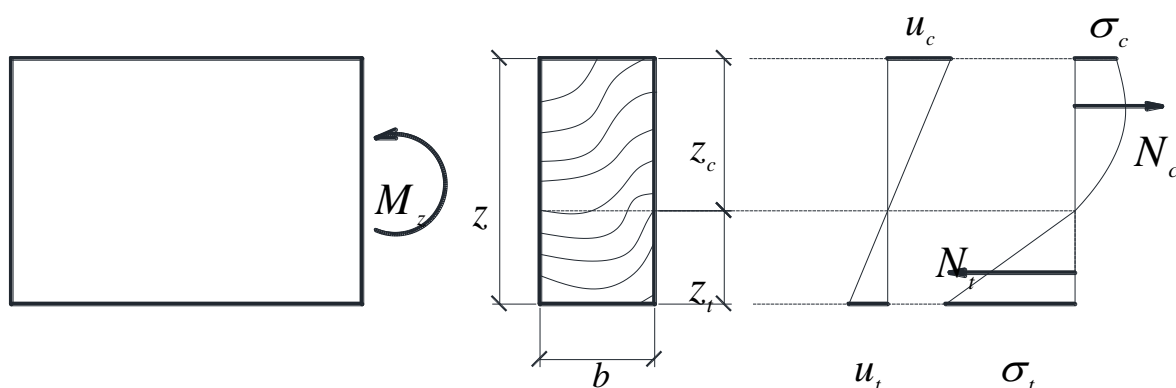


Рис. 6.12. Розміри та внутрішні зусилля в поперечному перерізі згинального елемента прямокутної форми

Внутрішні зусилля (6.32),(6.33), (6.34) та (6.35) з врахуванням форми перерізу та обраних функцій приймуть вигляд

$$N_{c,d} = b \cdot \frac{z_c}{u_c} \int_0^{u_c} \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} du; \quad (6.36)$$

$$N_{t,d} = b \cdot \frac{z_t}{u_t} \int_0^{u_t} E \cdot u du. \quad (6.37)$$

Проведемо інтегрування по висоті перерізу від нейтральної лінії до країв стиснутої зони

$$\begin{aligned} N_{c,d} &= b \cdot \frac{z_c}{u_c} \int_0^{u_c} \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} du = \\ &= b \cdot \frac{z_c}{u_c} \int_0^{u_c} \left(w_4 \cdot \frac{u^4}{u_{c,0,d}^3} + w_3 \cdot \frac{u^3}{u_{c,0,d}^2} + w_2 \cdot \frac{u^2}{u_{c,0,d}} + w_1 \cdot u \right) du \end{aligned} \quad (6.38)$$

$$\begin{aligned}
N_{c,d} &= b \cdot \frac{z_c}{u_c} \left(\frac{w_4}{5} \cdot \frac{u^5}{u_{c,0,d}^3} + \frac{w_3}{4} \cdot \frac{u^4}{u_{c,0,d}^2} + \frac{w_2}{3} \cdot \frac{u^3}{u_{c,0,d}} + \frac{w_1}{2} \cdot u^2 \right) \int_0^{u_c} = \\
&= b \cdot z_c \cdot \left(\frac{w_4}{5} \cdot \frac{u_c^4}{u_{c,0,d}^3} + \frac{w_3}{4} \cdot \frac{u_c^3}{u_{c,0,d}^2} + \frac{w_2}{3} \cdot \frac{u_c^2}{u_{c,0,d}} + \frac{w_1}{2} \cdot u_c \right)
\end{aligned} \tag{6.39}$$

Для розтягнутої частини зусилля розтягу будуть дорівнювати

$$N_{t,d} = b \cdot \frac{z_t}{u_t} \int_0^{u_t} E \cdot u du = b \cdot \frac{z_t}{u_t} \cdot \frac{E}{2} \cdot u^2 \int_0^{u_t} = b \cdot \frac{z_t}{u_t} \cdot \frac{E}{2} \cdot u_t^2; \tag{6.40}$$

Визначимо згинальний момент, що діє в стиснутій і розтягнутій зоні, провівши інтегрування по висоті перерізу від нейтральної лінії до країв зон

$$\begin{aligned}
M_{c,d} &= b \cdot \left(\frac{z_c}{u_c} \right)^2 \int_0^{u_c} \sum_{i=1}^4 w_i \cdot \frac{u^{i+1}}{u_{c,0,d}^{i-1}} du = \\
&= b \cdot \left(\frac{z_c}{u_c} \right)^2 \int_0^{u_c} \left(w_4 \cdot \frac{u^5}{u_{c,0,d}^3} + w_3 \cdot \frac{u^4}{u_{c,0,d}^2} + w_2 \cdot \frac{u^2}{u_{c,0,d}} + w_1 \cdot u^2 \right) du.
\end{aligned} \tag{6.41}$$

$$\begin{aligned}
M_{c,d} &= b \cdot \left(\frac{z_c}{u_c} \right)^2 \cdot \left(\frac{w_4}{6} \cdot \frac{u^6}{u_{c,0,d}^3} + \frac{w_3}{5} \cdot \frac{u^5}{u_{c,0,d}^2} + \frac{w_2}{4} \cdot \frac{u^4}{u_{c,0,d}} + \frac{w_1}{3} \cdot u^3 \right) = \\
&= b \cdot z_c^2 \cdot \left(\frac{w_4}{6} \cdot \frac{u_c^4}{u_{c,0,d}^3} + \frac{w_3}{5} \cdot \frac{u_c^3}{u_{c,0,d}^2} + \frac{w_2}{4} \cdot \frac{u_c^2}{u_{c,0,d}} + w_1 \cdot u_c \right) du.
\end{aligned} \tag{6.42}$$

Для розтягнутої зони згинальний момент буде рівний

$$M_{t,d} = b \cdot \left(\frac{z_t}{u_t} \right)^2 \int_0^{u_t} E \cdot u^2 du = b \cdot \left(\frac{z_t}{u_t} \right)^2 \cdot \frac{E}{3} \cdot u^3 \int_0^{u_t} = b \cdot \left(\frac{z_t}{u_t} \right)^2 \cdot \frac{E}{3} \cdot u_t^3 \tag{6.43}$$

$$M_{c,d} = b \cdot \left(\frac{z_c}{u_c} \right)^2 \int_0^{u_c} \sum_{i=1}^4 w_i \cdot \frac{u^{i+1}}{u_{c,0,d}^{i-1}} du; \tag{6.44}$$

$$M_{t,d} = b \cdot \left(\frac{z_t}{u_t} \right)^2 \int_0^{u_t} E \cdot u^2 du. \tag{6.45}$$

Після інтегрування внутрішні зусилля в прямокутному перерізі згинального дерев'яного елемента визначаємо за формулами:

$$N_c = b \cdot z_c \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+1} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}; \tag{6.46}$$

$$N_t = b \cdot z_t \cdot \frac{E \cdot u_t}{2}. \quad (6.47)$$

$$M_c = b \cdot z_c^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}. \quad (6.48)$$

$$M_t = b \cdot z_t^2 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \quad (6.49)$$

Загальний момент для деревини буде дорівнювати

$$M_Z = b \cdot z_c^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} + b \cdot z_t^2 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \quad (6.50)$$

Якщо взяти інтеграл від функції моменту $M_c = f(1/r)$, ми можемо визначити екстремум даної функції

$$\frac{d(M_Z)}{d(r)} = \left(b \cdot z_c^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} + b \cdot z_t^2 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \right)' \quad (6.51)$$

$$\frac{d(M_Z)}{d(r)} = \left(b \cdot z_c^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} + b \cdot z_t^2 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \right) / d(r) \quad (6.52)$$

де $d(r) = \frac{du_c}{z_c} = \frac{du_t}{z_t}$ рівняння (6.52) прийме вигляд

$$\frac{d(M_Z)}{d(r)} = \left(b \cdot z_c^3 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} \right) / du_c + \left(b \cdot z_t^3 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \right) / du_t \quad (6.53)$$

Щоб знайти екстремум функції $M_c = f(1/\rho)$, прирівняємо до нуля формулу (6.53)

$$\left(b \cdot z_c^3 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} \right) / du_c + \left(b \cdot \frac{u_t^3}{u_c^3} z_c^3 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \right) / du_t = 0. \quad (6.54)$$

Якщо поділити весь вираз на $b \cdot z_c^3$ ми отримаємо

$$\left(\sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} \right) / du_c + \left(\frac{E \cdot u_t^4}{3 \cdot u_c^3} \right) / du_t = 0 \quad (6.55)$$

Вираз (6.55) показує, що екстремум функції для «момент-кривина» не залежить від ширини та товщини перерізу балки. Тобто, максимальне значення

моменту, який може сприйняти переріз буде при постійних значення u_c та u_t . Назвемо ці значення $u_{c,u}$ та $u_{t,u}$.

Максимальне значення, яке може сприйняти поперечний переріз згинального дерев'яного елемента, прийнято визначати з графіка «момент-кривина», який будується на основі системи двох рівнянь. З однієї сторони рівноваги внутрішніх поздовжніх зусиль та моменту, що може сприйняти переріз. Вигляд графіку «момент-кривина» для прямокутного перерізу має вигляд на рис. 6.13.

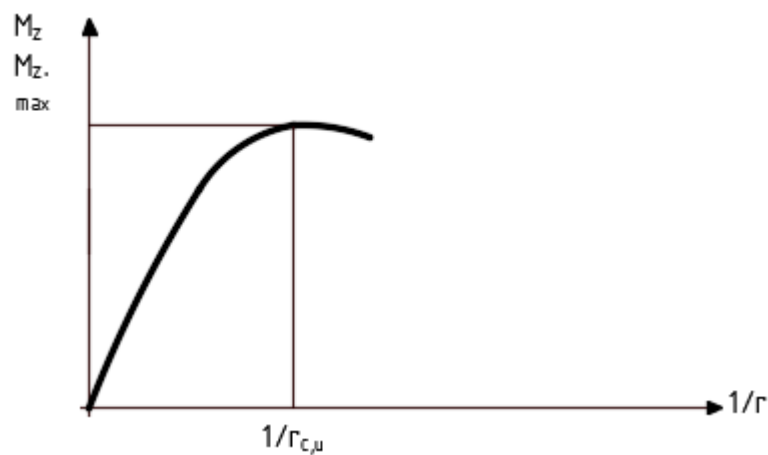


Рис. 6.13. Графік «момент-кривина» для прямокутного перерізу

$1/r_u$ - кривина, при якій переріз може сприйняти максимальний згинальний момент $M_{Z,max}$.

Запишемо систему рівняння для визначення напруженого стану згинального елемента з врахуванням функцій діаграм деформування матеріалу:

$$\begin{cases} b \cdot z_c \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+1} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} - b \cdot z_t \cdot \frac{E \cdot u_t}{2} = 0 \\ M_Z = b \cdot z_c^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} + b \cdot z_t^2 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \end{cases} \quad (6.56)$$

Розділимо верхню частину на $b \cdot z$, а нижню частину - $b \cdot z^2$. Цим самим ми побудуємо геометричних характеристик перерізу дерев'яного елемента

$$\begin{cases} \frac{z_c}{z} \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+1} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} - \frac{z_t}{z} \cdot \frac{E \cdot u_t}{2} = 0 \\ \frac{M_Z}{bz^2} = \frac{z_c^2}{z^2} \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} + \frac{z_t^2}{z^2} \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \end{cases} \quad (6.57)$$

Замінімо співвідношення висоти стиснутої зони та розтягнутої зони до висоти перерізу (6.56) та (6.57)

$$\frac{z_c}{z} = \frac{u_c}{u_c + u_t} \quad (6.58)$$

$$\frac{z_t}{z} = \frac{u_t}{u_c + u_t} \quad (6.59)$$

Отримаємо систему рівнянь для визначення напружено - деформованого стану поперечного перерізу прямокутної форми дерев'яного згинального елемента

$$\begin{cases} \frac{u_c}{u_c + u_t} \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+1} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} - \frac{u_t}{u_c + u_t} \cdot \frac{E \cdot u_t}{2} = 0 \\ \frac{M_Z}{bz^2} = \left(\frac{u_c}{u_c + u_t} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{w_i}{i+2} \cdot \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} + \left(\frac{u_t}{u_c + u_t} \right)^2 \cdot \frac{E \cdot u_t}{3} \end{cases} \quad (6.60)$$

Основною характеристикою згинального елемента є графік функції (6.60), який буде єдиний для прямокутного перерізу з однаковими характеристиками матеріалу

$$\frac{M_Z}{bz^2} = f(u_c, u_t) \quad (6.61)$$

Побудуємо графік даної функції для деревини з функцією діаграми деревини на стиск

$$\sigma_c = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u_{c,u}^{i-1}} \quad (6.62)$$

де $w_1 = 15378$; $w_2 = -1467$; $w_3 = -6673$; $w_4 = 2138$; $u_{c,fin} = 0,0061$, дані коефіцієнти отримані шляхом випробування деревини за жорстким режимом. Побудуємо графік залежності $\frac{M_z}{bz^2} = f(u_c, u_t)$ (рис. 6.14).

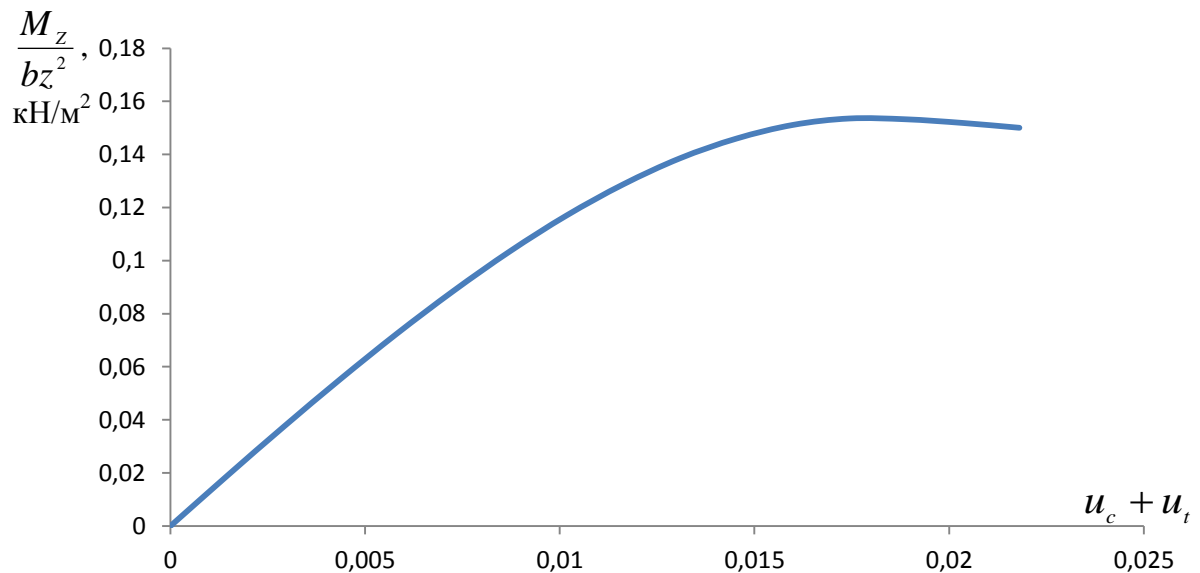


Рис. 6.14. Графік залежності моменту поділеного на геометричні характеристики від відносних деформацій, що виникають в перерізі

Апроксимація функції залежності дозволить спростити розрахунки дерев'яних згинальних елементів. Використаємо многочлен Лагранжа для апроксимації цієї функції. Ми отримаємо функцію залежності кривини від моменту

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{z} G_1 (M_z / bz^2)^2 + G_2 (M_z / bz^2) \quad (6.63)$$

де $\frac{1}{r}$ - кривина, яка виникає при дії моменту M_z в балці;

z, b - геометричні характеристик перерізу балки;

G_1, G_2 - коефіцієнти залежності (визначені для різних сортів деревини та наведені в табл. 6.1, 6.2, 6.3, 6.4).

Обернена функція від (6.63) є функція залежності моменту, який діє на переріз, від кривини. Її можна записати у вигляді формули

$$M_z = bz^2 \left(g_1 \left(\frac{1}{r} \cdot z \right)^2 + g_2 \left(\frac{1}{r} \cdot z \right) \right) \quad (6.64)$$

Таблиця 6.1

Коефіцієнти для визначення графіку «момент-кривина» для хвойних порід

Коефіцієнти	сосна		модрина		ялина	
	G_1	G_2	G_1	G_2	G_1	G_2
вологість 12%	0,4314	0,0709	0,2730	0,0731	0,4051	0,0708
вологість 21%	1,1040	0,0789	1,0860	0,0518	1,3017	0,0540
вологість 30%	3,1314	0,0446	2,7544	0,0255	3,5393	0,0164
вік 40 років	0,4826	0,0706	0,3302	0,0743	0,2907	0,0840
вік 20 років	0,6424	0,0766	0,4104	0,0831	0,4610	0,0899

Таблиця 6.2

Коефіцієнти для визначення графіку «момент-кривина» для листяних порід

Коефіцієнти	береза		вільха		ясен	
	G_1	G_2	G_1	G_2	G_1	G_2
вологість 12%	0,4950	0,0694	0,5582	0,0699	0,6380	0,0256
вологість 21%	1,8866	0,0312	2,0729	0,0635	1,0631	0,0363
вологість 30%	3,7642	0,0135	4,3377	0,0241	1,6639	0,0288
вік 40 років	0,5417	0,0706	0,5952	0,0752	0,5152	0,0413
вік 20 років	0,8082	0,0770	2,1083	0,0357	0,7592	0,0409

Таблиця 6.3

Коефіцієнти для визначення графіку «момент-кривина» для хвойних порід

Коефіцієнти	сосна		модрина		ялина	
	g_1	g_2	g_1	g_2	g_1	g_2
вологість 12%	-260,70	11,805	-189,40	11,947	-275,08	12,075
вологість 21%	-230,74	8,994	-222,35	9,925	-292,01	10,044
вологість 30%	-242,10	7,527	-199,37	7,725	-272,19	7,958
вік 40 років	-268,29	11,630	-198,06	11,583	-185,20	11,010
вік 20 років	-285,97	10,767	-199,48	10,592	-217,67	10,128

Таблиця 6.4

Коефіцієнти для визначення графіку «момент-кривина» для листяних порід

Коефіцієнти	береза		вільха		ясен	
	g_1	g_2	g_1	g_2	g_1	g_2
вологість 12%	-239,43	11,370	-275,13	11,352	-332,45	14,601
вологість 21%	-256,18	9,279	-214,70	7,804	-280,56	11,237
вологість 30%	-220,70	7,327	-185,29	6,452	-245,80	9,654
вік 40 років	-243,73	11,128	-267,41	10,831	-329,16	14,174
вік 20 років	-250,37	9,955	-461,02	10,447	-356,76	13,077

6.3.2 Використання оптимізованих діаграм для визначення прогину згинального дерев'яного елемента з перерізом прямокутної форми

З використанням залежності «момент-кривина» та епюри згинального моменту можна встановити кривину в кожній точці згинального елемента.

Якщо дерев'яний згинальний елемент розділити на нескінченно малі частини і визначити на краях цих проміжків кривину, то можна встановити середнє значення кривини на всій ділянці балки.

Нехай ми маємо i – ту ділянку балки нескінченно малої довжини dl , в якій в кожній точці по довжині виникає постійна кривина ξ . Тоді кут повороту двохкраїв цієї ділянки (рис. 6.15) буде дорівнювати

$$d\alpha = \frac{dl}{R} \quad (6.65)$$

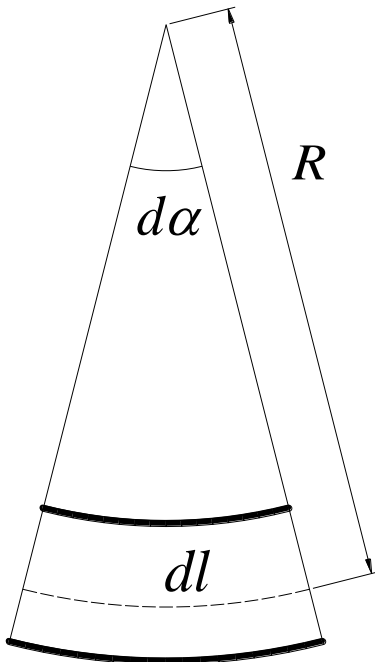


Рис. 6.15 Визначення кута повороту $d\alpha$

Як відомо кривина для такої ділянки буде оберненою величиною радіуса, тобто

$$r = \frac{1}{R} \quad (6.66)$$

З врахуванням (6.66) формула (6.65) прийме вигляд

$$d\alpha = rdl \quad (6.67)$$

Для визначення прогину балки слід задатися, початковими умовами. Для балки з симетричним навантаженням вихідними даними будуть: а) прогин на початку і в кінці балки дорівнює 0 ; б) кут повороту балки в її центрі рівний 0.

Тоді визначення прогину балки буде включати визначення кутів повороту ділянок балки, а також визначення прогинів на кожній ділянці цієї балки. Кут повороту ділянки, виходячи з центру балки, можна визначити шляхом інтегрування

$$\alpha = \int r(M_z)dl + \alpha_0 \quad (6.68)$$

Прогин балки з симетричним навантаженням буде дорівнювати

$$f = \iint r(M_z)dl + f_0 \quad (6.69)$$

6.4. Визначення напружено-деформованого стану в поперечному перерізі стиснуто-зігнутого та розтягнуто-зігнутого дерев'яного елемента

Основними передумовами для визначення напружено-деформованого стану стиснуто-зігнутих дерев'яних елементів є функція залежності відносних деформацій від прикладеного навантаження, що були вже описані раніше в п.6.1, 6.2, 6.3. Ці функції отримані шляхом випробування деревини відповідно на стиск та розтяг за «м'яким» режимом прикладення навантаження. Якщо в розтягнутому елементі присутня завжди стиснута та розтягнута зони, а сума напружень розтягу має відповідати сумі напружень стиску, то в стиснуто-зігнутому елементі можлива відсутність деформацій розтягу або стиску. Якщо схематично зобразити переріз то можна виділити три напружено-деформованих стани стиснуто-зігнутого та розтягнуто-зігнутого елемента:

1. *Перший* випадок напружено-деформованого стану стиснуто-зігнутого елемента, в якому відсутня зона, де виникають розтягнуті напруження рис. 6.16

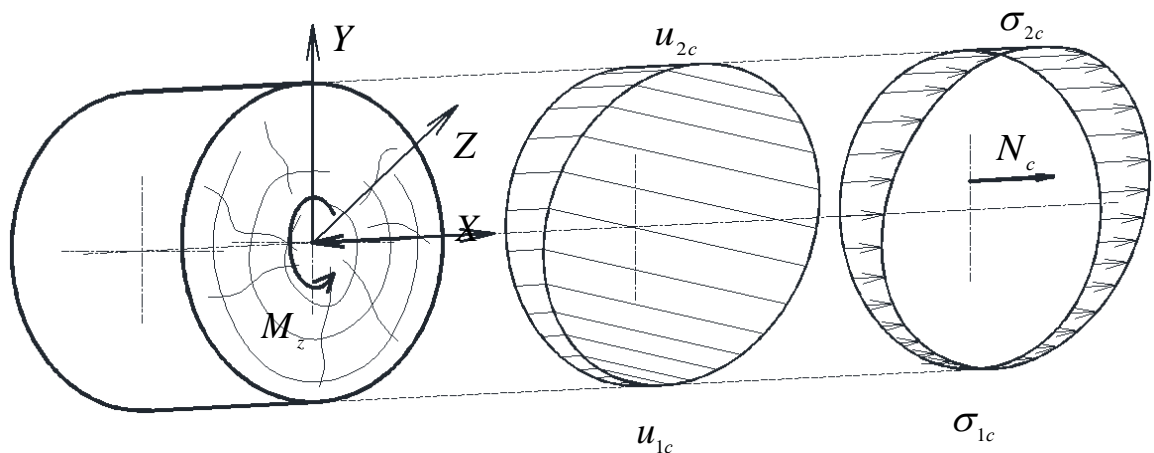


Рис. 6.16. *Перший* випадок напружено-деформованого стану стиснуто-зігнутого елемента

2. *Другий* випадок напружено-деформованого стану стиснуто-зігнутого елемента, в якому відсутня зона, де виникають стиснуті напруження (рис.6.17).

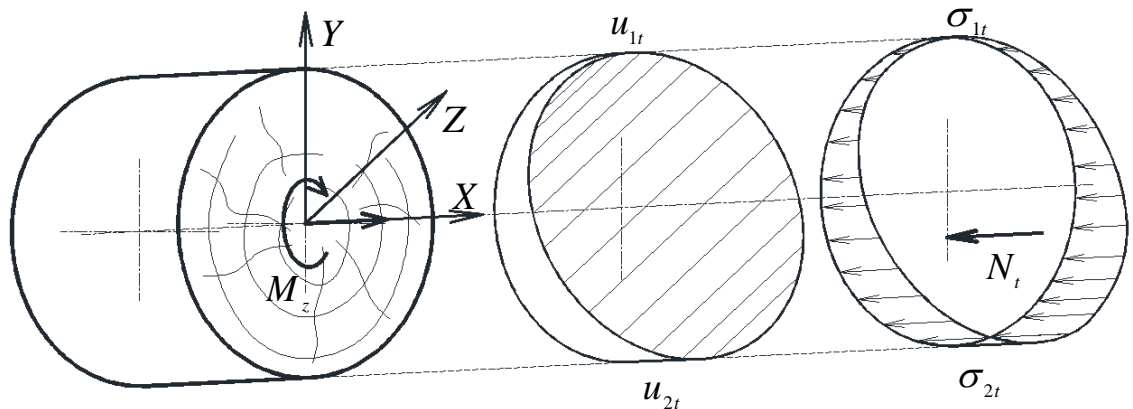


Рис. 6.17 Другий випадок напружено-деформованого стану стиснуто-зігнутого елемента

3. Третій випадок напружено-деформованого стану стиснуто-зігнутого елемента, в якому присутні напруження і стиску і розтягу рис. 6.18

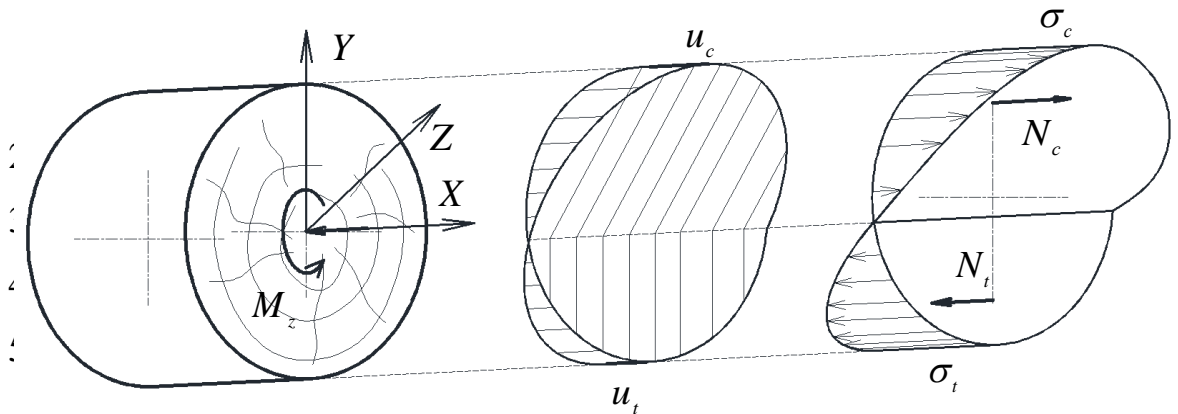


Рис. 6.18 Третій випадок напружено-деформованого стану стиснуто-зігнутого елемента

Для визначення випадку напружено-деформованого стану перерізу необхідно встановити межі переходу з повністю стиснутого перерізу в стиснуто-розтягнутий та перехід з останнього в розтягнутий. Для цього припустимо, що на переріз діють два зовнішні зусилля, а саме: повздовжня сила N_x та зовнішній момент M_z . В залежності від знаку повздовжньої сили N_x в перерізі можуть виникнути розтягуючі чи стискаючі напруження. Тому, саме встановлення знаку, буде відповідати фактору, в якому випадку напружено-деформованого стану буде знаходитися переріз. Розглянемо варіант, коли

повздожня сила буде викликати стиск в поперечному перерізі. Межа, при якій елемент буде повністю стиснутий відповідатиме рівнянням рівноваги (6.70)

$$\begin{cases} N_c = N_x \\ M_c = M_z \end{cases} \quad (6.70)$$

Напружено-деформований стан зображений на рис 6.19.

Щоб визначити, в якій стадії напружено-деформованого стану знаходиться елемент потрібно, визначити відносні деформації u_{c2} з рівняння рівноваг внутрішніх зусиль

$$N_x = \int_0^{u_{c2}} f_c(u) dA \quad (6.71)$$

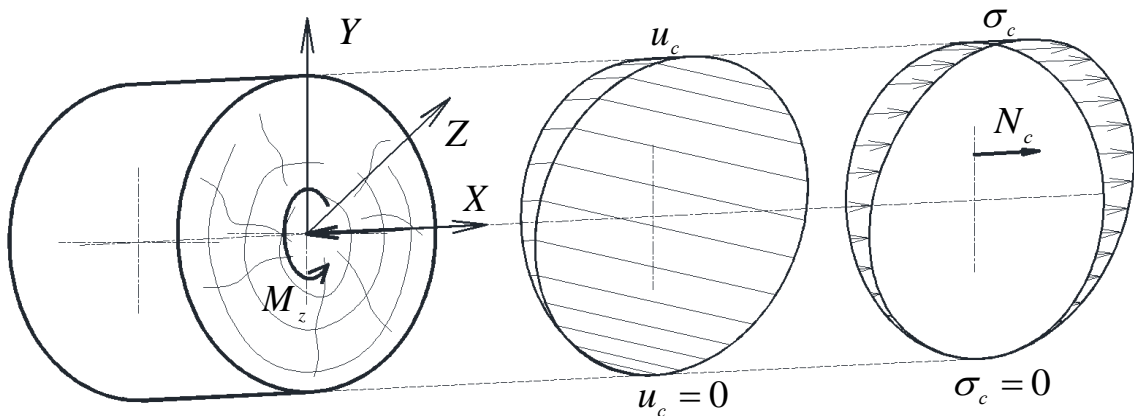


Рис. 6.19 Граничний напружено-деформований стан

Визначити момент, який може сприйняти переріз при знайдених відносних деформаціях u_{c2}

$$M_{z_c,ser} = \int_0^{u_{c2}} f_c(u) z dA \quad (6.72)$$

За умови, що знайдений згинальний момент буде більшим за діючий згинальний момент ($M_{z_c,ser} > M_z$), варіант напружено-деформованого стану для стиснуто-зігнутого елемента відповідає другому випадку. При умові, що знайдений момент менший за діючий ($M_{z_c,ser} < M_z$), варіант напружено-деформованого стану для стиснуто-зігнутого елемента відповідає першому варіанту.

За випадку розтягнуто-зігнутого елемента алгоритм визначення напружено-деформованого стану схожий, як для стиснутого рис. 6.20. Спочатку необхідно визначити відносні деформації в крайньому найбільш розтягнутому волокні u_{t2} за формулою (6.73)

$$N_x = \int_0^{u_{t2}} f_t(u) dA \quad (6.73)$$

Визначити момент, який може сприйняти переріз при знайдених відносних деформаціях u_{t2}

$$M_{z_t, ser} = \int_0^{u_{t2}} f_t(u) z dA \quad (6.74)$$

За умови $M_{z_t, ser} > M_z$ переріз буде весь розтягнутий, а при $M_{z_t, ser} < M_z$, буде мати стиснуту та розтягнуту зону.

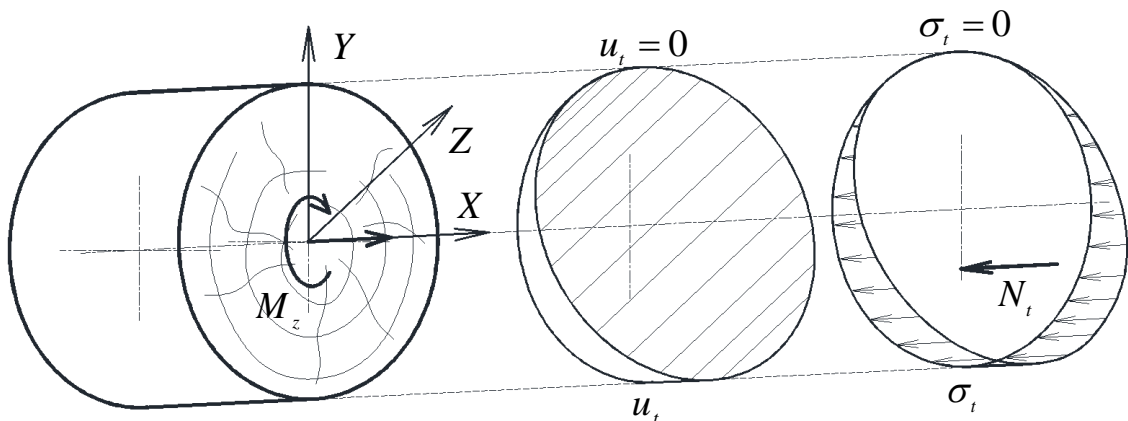


Рис. 6.20. Граничний напружено-деформований стан

Рівняння рівноваги (6.70) та внутрішні зусилля (6.77), (6.78) для першого випадку напружено-деформованого стану стиснуто-зігнутого елемента з врахування оптимізованої діаграми деформувань

$$N_c^I = b \cdot \frac{z_c}{u_c} \int_{u_{c1}}^{u_{c2}} \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} du; \quad (6.75)$$

$$M_c^I = b \cdot \left(\frac{z_c}{u_c} \right)^2 \int_{u_{c1}}^{u_{c2}} \sum_{i=1}^4 w_i \cdot \frac{u^{i+1}}{u_{c,0,d}^{i-1}} du; \quad (6.76)$$

Рівняння рівноваги (6.79) та внутрішні зусилля від стиску (6.80), (6.81) та розтягу (6.82), (6.83) для *другого* випадку напружено-деформованого стану для стиснуто-зігнутого та розтягнуто-зігнутого елемента з врахування оптимізованої діаграми деформувань

$$\begin{cases} N_c'' + N_t'' = N_x \\ M_c'' + M_t'' = M_z \end{cases} \quad (6.77)$$

$$N_c'' = b \cdot \frac{z_c}{u_c} \int_0^{u_c} \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u^i}{u_{c,0,d}^{i-1}} du; \quad (6.78)$$

$$M_c'' = b \cdot \left(\frac{z_c}{u_c} \right)^2 \int_0^{u_c} \sum_{i=1}^4 w_i \cdot \frac{u^{i+1}}{u_{c,0,d}^{i-1}} du; \quad (6.79)$$

$$N_t'' = b \cdot \frac{z_t}{u_t} \int_0^{u_t} E \cdot u du. \quad (6.80)$$

$$M_t'' = b \cdot \left(\frac{z_t}{u_t} \right)^2 \int_0^{u_t} E \cdot u^2 du. \quad (6.81)$$

Рівняння рівноваги (6.81) та внутрішні зусилля розтягу (6.83), (6.84) для *третього* випадку напружено-деформованого стану для розтягнутого елемента з врахування оптимізованої діаграми деформувань

$$\begin{cases} N_t''' = N_x \\ M_t''' = M_z \end{cases} \quad (6.82)$$

$$N_t''' = b \cdot \frac{z_t}{u_t} \int_{u_{t1}}^{u_{t2}} E \cdot u du. \quad (6.83)$$

$$M_t''' = b \cdot \left(\frac{z_t}{u_t} \right)^2 \int_{u_{t1}}^{u_{t2}} E \cdot u^2 du. \quad (6.84)$$

6.5. Висновки до шостого розділу

1. Сформульовано основні передумови та допущення, на базі яких розроблено методику оцінки напружено-деформованого стану розрахункового поперечного перерізу з суцільної, клеєної та модифікованої деревини за дії короткочасних навантажень з врахуванням оптимізованих діаграм деформування матеріалу.

2. Розроблено пропозиції визначення несучої здатності елементів з суцільної та композиційних матеріалів на її основі, які працюють за прямого поперечного згину, повздовжнього центрального або позацентрального стиску чи розтягу за дії одноразових короткочасних навантажень .

3. Науково обґрунтовано та виділено три характерні випадки напружено-деформованого стану нормального розрахункового поперечного перерізу роботи деревини під навантаженням за повздовжнього стиску та повздовжнього розтягу.

Матеріали розділу опубліковані в наступних наукових працях [42, 49-52, 56, 58, 64, 270, 271, 319].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Вперше розроблено алгоритм та запропоновано науково-технічні основи системного поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини (листяних і хвойних порід) та композиційних матеріалів на її основі з моменту зрубу до висушування й модифікації.

2. Опрацьовано методики комплексних експериментальних досліджень впливу вологості, віку та поверхневої й глибинної модифікацій на міцнісні та деформівні властивості суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі.

3. Вперше проведено цілеспрямовані комплексні експериментально-теоретичні дослідження і виявлено основні закономірності впливу вологості, віку, швидкості деформування на міцнісні та деформівні характеристики суцільної, а також клеєної та модифікованої деревини листяних (берези, вільхи, ясена) та хвойних (модрини, сосни, ялини) порід за жорсткого прикладання навантаження стискуванням уздовж волокон із урахуванням їх статистичного розкиду. Побудовано дійсні (повні) діаграми деформування суцільної, клеєної та модифікованої деревини від початку завантаження й до руйнування (висхідна й спадна вітки) та запропоновано їх апроксимації поліномом 4-го степеня.

4. Вперше запропоновано формулу з визначення критичних деформацій деревини та композиційних матеріалів на її основі, яка включає пружну й пластичну складові та запропоновано методику визначення граничних відносних деформацій суцільної, клеєної та модифікованої деревини листяних і хвойних порід на основі побудови діаграми «момент – кривина» згинального елемента прямокутного перерізу.

5. Удосконалено методику визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій (січного) деревини і композитів на її основі з урахуванням пружно-пластичності.

6. Встановлено, що сушіння деревини (від 30 до 12%) сприяє поліпшенню її основних міцнісних та деформівних властивостей, зокрема збільшує міцність

у 1,85–2,33 рази, початковий модуль пружності в 1,18–1,61 рази та зменшує деформівність (критичні деформації в 1,16–1,22 рази та граничні в 1,09–1,30 рази).

7. Виявлено, що незалежно від виду деревини, міцнісні та деформівні параметри діаграми деформування незначно зменшуються в інтервалі від 60 до 40 років та суттєво – від 40 до 20 років, зокрема:

- міцність деревини в інтервалі від 60 до 20 років зменшується на 27–45%;
- початковий модуль пружності на 12–17%;
- критичні відносні деформації листяних та хвойних порід зменшуються на 19–49%;
- граничні деформації зменшуються на 8–39%.

8. Межа міцності зразків з клеєної деревини хвойних та листяних порід збільшується на 13 – 25%, а деформівність в той чи інший бік несуттєво зростає або спадає порівняно із суцільною деревиною. Початкові модулі пружності всіх досліджуваних порід клеєної деревини збільшилися в межах від 13 % (ялина) до 31% (вільха) порівняно із суцільною деревиною.

9. Виявлено, що за поверхневої модифікації суцільної деревини листяних та хвойних порід максимальні напруження збільшуються на 12–22 % у порівнянні з суцільною деревиною вологістю 12% віком 60 років. Деформівність зменшується в межах 14–35 %. Водночас складові критичних деформацій функції (5) змінюється по різному: пружна – зменшується, а пластична – залишається на тих же позначках з незначними відхиленнями в той чи інший бік. Початковий модуль пружності досліджуваних зразків є більшим на 23–55%.

10. Встановлено, що поверхнева модифікація клеєної деревини збільшує міцність на 19%, початкові модулі пружності – на 21% в порівнянні зі зразками простої клеєної та зменшує відносні деформації новоутворених композиційних матеріалів: уздовж волокон – на 22%; поперечні перпендикулярні до клеєвого шва – на 27%; поперечні паралельні клеєвому шву – на 45%. Оптимальний час просочення – 720 хв.

11. Тимчасова гранична міцність глибоко модифікованих матеріалів полімерною композицією «силор» збільшується в межах 17–21%, деформівність (критичні відносні деформації) при цьому стають меншими на 7–20%, а початковий модуль пружності зростає на 26–35% в порівнянні з деревиною тих же порід, модифікованих поверхнево.

12. Удосконалено методику розрахунку граничного стану елементів та конструкцій з суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі з урахуванням дійсних (повних) та оптимізованих діаграм деформування матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агбалян Я.Г. Влияние влажности на длительную прочность и деформативность элементов деревянных конструкций из лиственницы при статическом изгибе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Москва, 1974. 18 с.
2. Алексієвець В.І. Робота та розрахунок сталевих нагельних з'єднань дерев'яних конструкцій за повторних навантажень: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування. Рівне, 2011. 21 с.
3. Александров, А.В., Матвеев А.В. Предельная нагрузка для сжатых и сжато-изогнутых стержней в упруго-пластической стадии. Вестник МИИТа. Москва: МИИТ, 2000. №3. С. 103–110
4. Алимов С.А. Длительная прочность и деформативность клееной древесины при изгибе. Исследования строительных конструкций с применением полимерных материалов: Сб. трудов ВИСИ. Воронеж: Изво ВГУ, 1975. Вып. 2. С. 97–102.
5. Антипов Д.В. Прочность и деформативность клеедеревянной балки с учётом времени, влажности и температуры эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Тамбов, 20 10. 173 с.
6. Арленинов Д.К., Беккер Д.А. Влияние уровня напряжения на ползучесть древесины. Известие высших учебных заведений. Лесной журнал, 2015. Т.6. №6(348). С. 128–137.
7. Арленинов Д.К. О расчете деревянных конструкций по деформированной схеме. Промышленное и гражданское строительство, 2016. №1. С. 43–46.
8. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов: научное пособие. М.: Лесная промышленность, 1978. 224 с.
9. Бабич Є.М., Довбенко В.С. Вплив полімерної композиції "Силор" на міцність, деформативність та тріщиностійкість залізобетонних балок при дії

статичних навантажень. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. Рівне: НУВГП, 2009. Вип. 18. С. 442–448.

10. Баженов В.А., Перельгин Л.М., Семенова Е.А. Об испытании древесины на сжатие поперек волокон. Труды института леса. Москва: АН СССР, 1953. Т.9. С. 315–331.

11. Бамбура А.М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: дис. ... докт. техн. наук : 05.23.01. Київ, 2005. 382 с.

12. Белянкин Ф.П. Длительное сопротивление дерева: научное пособие. Москва: Госстройиздат, 1934. 134с.

13. Белянкин Ф.П. Пластические деформации дерева при изгибе. Москва, 1936. 49 с.

14. Белянкин Ф.П., Яценко В.Ф. Деформативность и сопротивляемость древесины как упруго-вязко-пластического тела: монография. Киев: Изд. АН УССР, 1957. 200 с.

15. Бельский Г.Е. Устойчивость центрально сжатых стержней и рам в упругопластической работе. Расчет конструкций работающих в упругопластической стадии. Сборник трудов ЦНИИСК. Москва, 1961. Выпуск 7. С. 239–267.

16. Бехта П.А. Технологія деревинних композиційних матеріалів: підручник. Київ: Основа, 2003. 336 с.

17. Бехта П.А., Салабай Р.Г. Класифікація деревинних композиційних матеріалів. Наукові праці Лісівничої академії наук України. Львів: РВВ НЛТУ України, 2002. Вип. 1. С. 114-117.

18. Бехта П.А., Німц П. Вплив високої температури на фізико-механічні властивості деревини ялини. Наукові праці Лісівничої академії наук України. Львів: РВВ НЛТУ України, 2003. Вип. 2. С. 117-122.

19. Бойко М.Д. Влияние температурно-влажностного состояния древесины на ее прочность. М.: Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1952. 96 с.

20. Бондарев Б.А., Поветкин С.В. Усталость клееной древесины при изгибе. Научный вестник ВГАСУ. Воронеж, 2009. С. 14–20.
21. Боровиков А.М. Влияние температуры и влажности на упругость, вязкость и пластичность древесины: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Воронеж, 1970. 310с.
22. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине: справочник. Москва: Лесная промышленность, 1989. 296 с.
23. Бурындин В.Г. Экологически безопасные древесные композиционные материалы с карбамидными связывающими: дис. ... докт. техн. наук: 05.21.03. Екатеринбург, 2000. 259 с.
24. Быков В.В. Экспериментальные исследования прочности и деформативности древесины сибирской лиственницы при сжатии и растяжении вдоль волокон с учетом длительного действия нагрузки: Известия вузов. Строительство и архитектура, 1967. №8. С. 3–8.
25. Бывших В.Д. Исследование влияния температуры и влажности древесины на ее упругопластические характеристики. Химки, 1958.
26. Ванин С.М. Древесиноведение: справочник. М: Гослесбумиздат, 1949. 472 с.
27. Вареник А.С. Устойчивость сжатых элементов деревянных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Санкт-Петербург, 1994. 22 с.
28. Вареник К. А. Аппроксимация диаграммы деформирования древесины. Вестник НГУ. Новгород, 2013. №75. Т.1. С. 60–64.
29. Вареник К. А. Расчет центрально-сжатых деревянных элементов с учетом ползучести: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Новгород Великий: НГУ им. Ярослава Мудрого, 2015. 167 с.
30. Васильев А.Ю., Прыгунков А.В. Влияние температурно-влажностных режимов на прочность древесины после длительной ее эксплуатации. Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс. Одесса, 2015. С. 110–113.

31. Веселовский Р.А., Шаля Е.Н. Восстановление эксплуатационных свойств строительных конструкций с применением новых полимерных материалов. Новини науки Придніпров'я. "Інженерні дисципліни": Науково – практ. журнал. Дніпро, 2004. № 4. С. 20–23.
32. Винник Н.И. Модифицированная древесина. Москва: Лесная пром-сть, 1980. 159 с.
33. Вихров В.Е. Термо-химическая модификация древесины синтетическими смолами. Модификация древесины синтетическими полимерами. Минск: БТИ, 1973. С. 9–16.
34. Волынский В.Н. Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины: монография. Архангельск: Издательство АГТУ, 2000. 196 с.
35. Воронюк И.С. Учет нисходящей ветви диаграммы деформаций при чистом изгибе. Строительная механика и расчет сооружений. 1983. №4. С. 17–20.
36. Гениев Г.А. О критерии прочности древесины при плоском напряженном состоянии. Строительная механика и расчет сооружений, 1981. №3. С. 15-20.
37. Гениев Г.А., Мамаева Г.В., Пятикрестовский К.П. Моделирование процесса деформирования и расчет прочности деревянных элементов при циклических нагружениях. Журнал «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений» ВНИИТПИ, 2004. №3. С. 11–14.
38. Глухов В.И., Райчук Ф.З., Шолохова А.Б., Хрулев В.М. Влияние агрессивных сред на свойства модифицированной полимерами древесины. Известия вузов. Лесной журнал. Москва, 1985. №1. С. 96–99.
39. Глухов В.К., Райчук Ф.З., Блинов Г.А. Разработка опытно-промышленной технологии радиационно-химического модифицирования древесины лиственных пород. Экспериментальные и теоретические исследования легких конструкций из азбестоцемента и древесины. Москва: Стройиздат, 1978. С.100–108.

40. Гомон С.С. Аналіз залежностей для побудови повних діаграм механічного стану деревини « σ - u ». Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2019. Вип. 37. С. 136–142.

41. Гомон С.С. Визначення критичних деформацій різних порід деревини вирощених на території України та за її межами. Sciences of Europe. Praha, 2020. No 54. Vol.1.Pp. 36–41.

42. Гомон С.С., Гомон П.С., Верешко О.В. До визначення критичних деформацій хвойних та листяних порід деревини. Містобудування та територіальне планування. Київ: КНУБА, 2020. Вип. 73. С.78–87.

43. Гомон С.С., Гомон С.С., Гомон П.С., Верешко О.В. До визначення січного модуля деформацій клеєної деревини модифікованої «СИЛОРОМ». Містобудування та територіальне планування. Київ: КНУБА, 2020. Вип. 74. С. 92–101.

44. Гомон С.С., Гомон П.С. Побудова дійсних діаграм механічного стану деревини « σ - u » суцільного перерізу ялини та берези за жорсткого режиму випробувань. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2020. Вип. 38. С. 321–330.

45. Гомон С., Гомон П., Караван В. Експериментальні дослідження хвойних та листяних порід деревини одноразовим короткочасним навантаженням на стиск уздовж волокон за жорсткого режиму випробувань. Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура та сільськогосподарське будівництво. Львів: ЛНАУ, 2020. №21. С. 34–40.

46. Гомон С.С., Гомон П.С. Теоретичні основи для побудови повних діаграм деформування деревини. Інновації у будівництві: збірник тез доповідей V міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів, м. Луцьк, 14 травня 2020 року. Луцьк: ЛНТУ, 2020. С. 5–7.

47. Гомон С.С., Гомон С.С., Зінчук А.В. Дослідження модифікованої силором клеєної деревини на стиск вздовж волокон. Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вісті Донецького гірничого інституту”. Покровськ: ДВНЗ “Доненський НТУ”, 2017. №1. С. 134–138.

48. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Зінчук А.В. Деформативність модифікованої силором клеєної деревини за роботи на стиск вздовж волокон. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2017. Вип. 34. С. 110–117.

49. Гомон С.Ст., Гомон С.С. Напружено-деформований стан нормальних перерізів за роботи деревини на поперечний згин з урахуванням повної діаграми деформування матеріалу. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2011. Вип. 22. С. 265–271.

50. Гомон С.Ст., Гомон С.С. Особливості роботи будівельних конструкцій з деревини при дії повторних навантажень за критерієм деформаційного руйнування. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2014. Вип. 28. С. 152–157.

51. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А., Яцук В.О. Визначення напружено-деформованого стану нормального перерізу за роботи деревини на поперечний згин з урахуванням повної діаграми деформування матеріалу. Проблеми розвитку міського середовища. Науково-технічний зб. Київ: НАУ, 2012. Вип.8. С. 66–72.

52. Гомон С.С., Гомон П.С., Гомон С.Ст. Універсальний метод визначення напружень в стиснутій зоні дерев'яних балок прямокутної форми на основі їх деформування. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. Budapest, 2020. Feb. VIII(27). Issue: 224. P. 10–12.

53. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Діаграми механічного стану деревини сосни за одноразового короткочасного деформування до повної втрати міцності матеріалу. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2012. Вип 23. С. 166–171.

54. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Діаграми механічного стану деревини сосни за повторного деформування до повної втрати міцності матеріалу. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2012. Вип 24. С. 106–112.

55. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Построение полной диаграммы деформирования древесины сосны при действии статической загрузки. Сборник научных трудов “Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии”. ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет». Могилев, 2012. Часть 2. С. 81–82.

56. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Прогнозування залишкового часу працездатності конструкцій з деревини за повторних навантажень. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2015. Вип. 31. С. 417–421.

57. Гомон С.С. Дослідження критичних деформацій різних порід деревини експериментальним шляхом: збірник тез доповідей V міжнародної науково-технічної конференції «Ефективні технології в будівництві» та VII міжнародної науково-технічної конференції «Нові технології в будівництві», м. Київ, 19 листопада 2020 р. Київ: КНУБА, 2020. С. 138–139.

58. Гомон С.С. Математическая модель определения предельных деформаций лиственных и хвойных пород. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. Budapest, 2020. Sep. VIII (29), Issue: 238. Pp. 46–50.

59. Гомон С.С. Методика експериментальних досліджень модифікованої силором деревини з стимуляцією просочення ультразвуком за роботи на стиск вздовж волокон. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2018. Вип. 36. С. 81–86.

60. Гомон С.С. Методика досліджень основних механічних та деформативних властивостей суцільної та клеєної деревини. Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування: матеріали міжнародної конференції, м. Тернопіль, 24-27 вересня. 2019 р. Тернопіль:ТНТУ, 2019. С. 198-200.

61. Гомон С.С. Перспективи використання модифікованої деревини в Україні для об'єктів сільського господарства. Актуальні задачі сучасних технологій: збірник тез доповідей VI міжнародної науково-технічної

конференції молодих учених та студентів, м. Тернопіль, 16-17 листопада 2017 р. Том 1. Тернопіль: ТНТУ, 2017. С. 72.

62. Гомон С.С., Дмитрук В.П., Мельник Ю. А., Верешко О.В. Аналіз поверхневих та глибинних способів модифікації деревини. Сучасні проблеми містобудування. Проблеми та перспективи розвитку: збірник тез доповідей всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів, м. Луцьк, 15 листопада 2019 р. Луцьк: ЛНТУ, 2019. С.74–75.

63. Гомон С.С., Савчук В.О. До визначення оптимального часу просочення полімерної композиції «СИЛОР» в тіло деревини. Актуальні задачі сучасних технологій: збірник тез доповідей VIII міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, м. Тернопіль, 27–28 листопада 2019 р. Том 1. Тернопіль: ТНТУ, 2019. С. 70.

64. Гомон С.С., Савчук В.О., Мельник Ю. А., Верешко О.В. Апроксимація діаграм механічного стану деревини з підвищеним вмістом вологи. Іноваційні процеси в галузі дорожнього будівництва: матеріали IV всеукраїнської науково-практичної інтернет- конференції молодих учених та студентів, м. Луцьк, 30 жовтня 2020 р. Луцьк: ЛНТУ, 2020.

URL: <https://sites.google.com/lntu.edu.ua/konf2020ada/tezi>.

65. Гомон С.С., Савчук В.О., Мельник Ю.О., Верешко О.В. Область застосування та способи модифікації композиційних матеріалів на основі деревини. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк: ЛНТУ, 2019. Вип. 12. С. 44–50.

66. Гомон С.С., Сальчук В.Л., Верешко О.В. Прочностные и деформативные свойства увлажненной древесины. Eurasian scientific congress. Abstracts of the 8th International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2020. Pp. 136–139. URL: <https://sci-conf.com.ua/viii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-eurasian-scientific-congress-9-11-avgusta-2020-goda-barselona-ispaniya-arhiv/>.

67. Гомон С.С., Сальчук В.Л., Савчук В.Л., Верешко О.В. Експериментальні дослідження деревини за жорсткого режиму випробувань за

стандартної вологості. Проблеми інтегрованого розвитку міст: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції учених та студентів, м. Луцьк, 29-31 січня 2020 р. Луцьк: ЛНТУ, 2020. С. 18–20.

68. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Дослідження міцності та деформативності деревини сосни за повторного деформування до досягнення повної втрати міцності матеріалу. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк: ЛНТУ, 2014. Вип. 1. С. 40–46.

69. Горбачова О.Ю. Щодо впливу термічного модифікування на властивості деревини граба. Лісове і садово-паркове господарство: [електронний ресурс]. Київ, 2016. №9. Режим доступу до ресурсу: <http://ejournal.studnubip.com/zhurnal-9/ukr/horbachova-o-yu>.

70. ГОСТ 16483.9–73. Древесина. Метод определения модуля упругости при статическом изгибе. 6 с.

71. ГОСТ 16483.10–73. Древесина. Метод определения модуля упругости при сжатии вдоль волокон.

72. ГОСТ 16483.26–73. Древесина. Метод определения модуля упругости при растяжении вдоль волокон. 5 с.

73. ГОСТ 21583.8–93. Древесина модифицированная. Метод определения модуля упругости при сжатии. 8 с.

74. ГОСТ 3934–1. Древесина авиационная. Правила приемки и методы контроля.

75. ГОСТ 9623–87. Древесина слоистая клееная. Методы определения предела прочности и модуля упругости при сжатии. 6 с.

76. ГОСТ 23551-79. Древесное сырье для изготовления модифицированной древесины. Технические условия. М.: Стройиздат, 1979. 15 с.

77. ГОСТ 24329–80. Древесина модифицированная. Способы модифицирования. М.: Стройиздат, 1980. 16 с.

78. ГОСТ 2140–81. Пороки древесины. Классификация, термины, определения. Способы измерения. М.: Стройиздат, 1981. 118 с.

79. ГОСТ 16483.5–73*. Древесина. Методы определения предела прочности при скалывании вдоль волокон.
80. Грабар І.Г. Про єдину природу довготривалого і короткочасного руйнування та прискорення визначення ресурсу конструкцій. Матеріали 4 міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології в аерокосмічному комплексі». Житомир, 1999. С. 13–18.
81. Гринкруг Н.В. Моделирование и расчет элементов деревянных конструкций при химических агрессивных воздействиях: дисс. канд. техн. наук, 05.23.01. Владивосток, 2004. 202 с.
82. ГССД 69–84. Древесина. Показатели физико-механических свойств малых чистых образцов. Издание Госстандарта СССР, 1984.
83. Губенко А.Б. Устойчивость центрально сжатых цельных деревянных стержнем. Исследование прочности и устойчивости деревянных стержней: Сб. ЦНИПС. Москва: Стройиздат, 1940. С. 3–13.
84. Губенко А.Б., Шишкин В.Е. Исследование несущей способности и жесткости деревянных элементов с различной формой сечения при поперечном изгибе. Исследования по деревянным конструкциям. Сборник ЦНИПС. Москва: Стройиздат, 1950. С. 94–148.
85. Гусев П.Б. Стойкость деревянных конструкций, эксплуатируемых в производствах в агрессивно химических средах. Повышение эффективности конструкционного использования древесины в строительстве. Москва: Стройиздат, 1985. С. 39–45.
86. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ: Мінбуд України, 2006. 75 с.
87. ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. Київ: Укрархбудінформ, 2017. 111с.
88. Деловая М.И. Деформирование изгибаемых клееных деревянных элементов при статическом нагружении: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Курск, 2001. 166 с.

89. Денеш Н.Д. Прочность деревянных элементов конструкций покрытий при основных эксплуатационных воздействиях: дис... канд.тех.наук: 05.23.01. Москва, 1987. 207с.
90. Деризгалов О.Ю. Разработка, конструирование и исследование деревянного ребристо-кольцевого купола с блоками жесткости и сборно-разборными узлами: автореф. дис... канд.тех.наук: 05.23.01. Томск, 2007. 21с.
91. Десов А.Е. Макроструктурная гипотеза прочности бетона при сжатии и результаты ее экспериментальной проверки. Известие вузов: Строительство и архитектура, 1972. №7. С. 320–327.
92. Дмитриева К.О. Устойчивость стержневых элементов из древесины при силовом и средовом нагружении: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Курск, 2016. 161 с.
93. Довбенко В.С. Дослідження полімерної композиції "Силор" як ефективного засобу ремонту, відновлення та підсилення бетонних та залізобетонних конструкцій. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. Рівне: НУВГП, 2010. Вип. 20. С. 181–186.
94. Довбенко В.С. Напружено-деформований стан залізобетонних згинальних елементів підсиленіх полімерною композицією: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01. Рівне, 2015. 24 с.
95. Дорофеев Н.С., Хрулев В.М., Машкин Н.А. Модифицированная древесина – эффективный материал для малых архитектурных форм. Известие вузов. Строительство и архитектура. Новосибирск, 1986. №12. С. 54–57.
96. ДСТУ 3129:2015. Деревина. Методи відбору зразків і загальні вимоги до фізико-механічних випробувань невеликих бездефектних зразків. Київ: Мінрегіон України, 2016. 9 с.
97. ДСТУ Б.В.2.6–151:2010. Конструкції дерев'яні клеєні. Загальні технічні умови. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 21 с.
98. ДСТУ 4922:2008. Лісоматеріали та пилопродукція. Методи визначення вологості. Київ: Мінрегіон України, 2009. 11 с.

99. ДСТУ EN 336–2003. Піломатеріали конструкційні із хвойних порід та тополі. Розміри. Допустимі відхилення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2004. 8 с.
100. ДСТУ EN 518–2003. Лісоматеріали конструкційні. Сорткування. Вимоги до стандартів на візуальне сорткування за міцністю. Київ: Мінрегіонбуд України, 2004. 9 с.
101. ДСТУ EN 338. Лісоматеріали конструкційні. Класи міцності. Київ: Мінрегіонбуд України, 2004. 10 с.
102. ДСТУ EN 384–2001. Лісоматеріали конструкційні. Визначення характеристичних значень механічних властивостей. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 8 с.
103. ДСТУ EN 380-2008. Лісоматеріали конструкційні. Загальні настанови щодо методів випробування на статичне навантаження. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 8с.
104. Знаменский Е.М. Несущая способность элементов деревянных конструкций при статическом и динамическом нагружении. Москва, 1956.
105. Золднерс Ю.А. Полимеризация мономеров в структуре древесины. Теоретические аспекты модификации древесины: Тез. Докл. Всесоюз. научн. конф. Рига, 1983. С. 23-26.
106. Иванов А.М. Исследования диаграммы механических испытаний древесины. Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1959. №4. С. 116–122.
107. Иванов Ю.М. Деформации древесины под действием повторной статической нагрузки при сжатии вдоль волокон. Вопросы прочности и изготовления деревянных конструкций. Москва, 1952. С. 7–47.
108. Иванов Ю.М. К вопросу исследования разрушение древесины при сжатии вдоль волокон. Труды института леса АН СССР. 1953. Т. IX. С. 88–92.
109. Иванов Ю.М. Эластические свойства древесины. Исследование физических свойств древесины. Сборник трудов. Институт леса. Москва, 1959. С. 76-82.

110. Иванов Ю.М. О физико-механических испытаниях модифицированной древесины. Пластификация и модификация древесины. Рига, 1970. С.17-25.
111. Иванов Ю.М. Прочность и напряжения клеевых соединений древесины: монография. Москва: Лесная промышленность, 1973. 210 с.
112. Иванов Ю.М., Славик Ю.Ю. Длительная прочность древесины при растяжении поперек волокон. Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1986. №10. С. 22–26.
113. Іванюк А. М. Несуча здатність дерев'яних балок з пошкодженнями у вигляді наскрізних тріщин: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування. Рівне, 2011. 158 с.
114. Карабанов В.А. Влияние температуры и влажности воздуха на прочность и выносливость клеевых соединений деревянных балок: автореф. дис. канд.техн. наук: 05.23.01. Москва, 1983. 23 с.
115. Квасников Е.Н. К вопросу о влиянии влажности и температуры на кратковременное и длительное сопротивление древесины. Инженерные конструкции, 1972. С. 114–124.
116. Киселева О.А., Сашин М.А., Ярцев В.П. Прогнозирование работоспособности древесины под воздействием различных факторов. Прогрессивные технологии развития. Тамбов, 2004. С. 247–249.
117. Киселева О.А., Ярцев В.П., Сашин М.А. Влияние жидких агрессивных сред на несущую способность древесных композитов. Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. Москва, 2006. №6. С. 24-26.
118. Кліменко В.З. Конструкції з клеєної деревини Світовий досвід. Промислове будівництво та інженерні споруди, 2009. № 1. С. 39–43.
119. Клюева Н.В, Андросова Н.Б. Некоторые предложения для конструктивной защиты зданий и сооружений от прогрессирующего разрушения. Строительство и реконструкция, 2015. №4(60). С. 72–78.
120. Кноп К.К. Влияние наклона волокон на модуль упругости древесины сосны и ели. Техника воздушного флота, 1935. № 4. С. 75–87.

121. Колешная А.Д., Никулин С.С. Стабилизация эксплуатационных свойств древесины. Известие вузов. Строительство и архитектура. Новосибирск, 1994. №4. С. 105–107.
122. Колчунов В.И., Андросова Н.Б., Ключева Н.В., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружения при запроектных воздействиях: Научное издание. - М.: Издательство АСВ, 2014. 208 с.
123. Колчунов В.И., Пятикрестовский К.П. Особенности расчета деревянных конструкций на прочность по деформациям. Строительство и реконструкция, 2013. №2. С. 25–34.
124. Копаница Д.Г., Лоскутова Д.В., Савченко В.И., Пляскин А.С. Определение коэффициента постели для расчета узлового соединения элементов древесины на МЗП. Вестник ТГАСУ, 2011. №2. С. 79–88.
125. Коцегубов В.П. Некоторые вопросы долговременного сопротивления сосны сжатию вдоль волокон. Исследования деформативности и прочности древесины. Москва, 1956. 171 с.
126. Коченов В.М. Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций: монография. Москва: Стройиздат, 1953. 320 с.
127. Кривенко П.В., Цапко Ю.В., Гузій С.Г. Вогнезахист будівельних конструкцій з деревини. Теорія і практика: монографія. Харків: Технологічний центр, 2018. 348 с.
128. Крутасов Б.В., Полубоярова Н.Ф., Павлюк М.В., Машкин Н.А. Структурные изменения модифицированной древесины в условиях повышенной влажности. Труды НГАСУ, 1999. Т.2. №2(4). С. 99–105.
129. Кульман С.М., Бугаєнко Я.П., Бойко Л.М., Загурський Й.В. Дослідження феномену попереднього напружених дерев'яних клеєних балок. Науковий вісник НЛТУ України. Львів, 2019. Т.29. №5. С. 97–102.
130. Кульман С.М. Базові моделі кінетики деформування-руйнування деревних композиційних матеріалів. Науковий вісник НЛТУ України. Львів, 2019. Т.29. №7. С. 134–141.

131. Курицын В.Н., Тюленева Е.М. Экспериментальное уточнение реологической модели древесины. Лесной журнал, 2009. №5. С. 104–109.
132. Лабудин Б.В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой: дисс. ... докт. техн. наук: 05.23.01. Архангельск, 2006. 310 с.
133. Латынин А.В. Создание клеевых соединений древесины повышенной прочности: дисс. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Воронеж, 2015. 134 с.
134. Леннов В.Г. Исследование сопротивления сосны с учетом фактора времени. Исследования прочности и деформативности древесины. Москва: Госстройиздат, 1956. С. 93–106.
135. Леннов В.Г. Экспериментальное исследование древесины на сжатие и растяжение вдоль волокон с учетом длительного действия загрузки. Известия вузов. Строительство и архитектура. 1958. №2. С.147–157.
136. Леонтьев Н.Л. Влияние влажности на физико-механические характеристики древесины: монография. Москва: Гослемуиздат, 1962. 114 с.
137. Линьков Н.В. Несущая способность и деформативность соединений деревянных конструкций композиционным материалом на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани. Журнал «ПГС». Москва: ООО «Издательство ПГС», 2010. № 10/2010. С. 28–31.
138. Ломакин А.Д. Пропитка древесины способом нанесения на поверхность. Строительные материалы, 2012. №7. С. 110–112.
139. Лукаш П.А. Основы нелинейной строительной механики: научное пособие. Москва: Стройиздат, 1978. 208 с.
140. Луцьковський В.М. Оцінка працездатності дерев'яних конструкцій за параметрами їх деформування: автореф. дис.. ... канд. техн. наук. Полтава, 1999.
141. Любошиц М.И. Влияние скорости испытания на предел пластического течения древесины сосны: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1950.

142. Макаревич С.С., Любецкий Д.И. Определение модуля упругости модифицированной древесины при сжатии. Модификация древесины синтетическими полимерами. Минск, 1973. С. 128–137.

143. Макаренко Л.П., Фенко Г.А. Практический способ определения модуля упругости упруго-пластических характеристик бетона при сжатии. Известия вузов. Строительство и архитектура. 1970. №10. С. 141–147.

144. Мамедова З.К. Химическая стойкость натуральной и пропитанной древесины березы к действия растворов натриевой щелочи. Известие вузов. Строительство и архитектура. Новосибирск, 1975. №9. С. 76–79.

145. Машкин Н.А. Старение модифицированной древесины при циклических воздействиях. Молодежь и научно-технический прогресс в строительстве. Новосибирск, 1983. С. 56–59.

146. Машкин Н.А., Гребенюк Г.И., Хрулев В.М. Исследование напряженного состояния рациональной модели модифицированной древесины при сжатии поперек волокон. Методы расчета конструкций из дерева, фанеры и пластмасс. Ленинград: ЛИСИ, 1985. С. 31–40.

147. Машкин Н.А. Атмосферостойкость модифицированной древесины для шахтостроения в условиях Западной Сибири. Известие вузов. Строительство и архитектура. Новосибирск, 1994. №1. С. 46–51.

148. Машкин Н.А. Эксплуатационная стойкость модифицированной древесины в строительных изделиях и ее технологическое обеспечение: дисс. ... докт. техн. наук: 05.23.05. Новосибирск, 2000. 366 с.

149. Методы физико-механических испытаний модифицированной древесины. Москва: Стройиздат, 1973. 47 с.

150. Микульский В.Г. Долговечность строительных конструкций и сооружений из композиционных материалов: научное пособие. Москва: Стройиздат, 1993. 251 с.

151. Михайловський Д. В., Коваленко М.С., Матющенко Д.М. Аналіз техніко-технологічних властивостей клеєної деревини як перспективного

матеріалу для будівельних конструкцій. Чернігівський науковий часопис. Серія 2, Техніка і природа: Чернігів, 2011. №2. С. 122–127.

152. Назаров Ю.П., Турковский С.Б., Погорельцев А.А. Эффективность несущих клееных деревянных конструкций в сейсмических районах строительства. Промышленное и гражданское строительство, 2009. №10. С.10–13.

153. Найчук А. Я., Орлович Р.Б. Оценка прочности древесины методами механики разрушения. Совершенствование строительных конструкций из дерева и пластмасс. Межвуз. темат. сб. трудов. Санкт-Петербург: СПбИСИ, 1992. С.43–48.

154. Найчук А. Я., Петрукович А.Н. О вязкости разрушения древесины сосны при кратковременном действии статической нагрузки. Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. Брест, 2005. № 2(32). С. 60–63.

154. Найчук А.Я. Прочность элементов деревянных конструкций в условиях сложного неоднородного состояния: дисс. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01. Москва, 2006. 378 с.

155. Орлович Р.Б. Длительная прочность и деформативность конструкций из современных древесных материалов при основных эксплуатационных воздействиях: автореф. дисс. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01. Ленинград, 1991. 50 с.

156. Павліков А.М. Напружено-деформований стан навкісно завантажених залізобетонних елементів у закритичній стадії: дис. ... докт. техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2007. 356 с.

157. Павлюк А.П., Гомон С.Ст. Методика дослідження балок з цільної та клеєної деревини в умовах косоного згину. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Рівне: НУВГП, 2016. Вип. 32. С. 231–236.

158. Павлюк А.П. Напружено-деформований стан елементів з клеєної деревини в умовах косоного згину: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Рівне, 2018. 238 с.

159. Павлюк М.В., Машкин Н.А., Крутасов Б.В. Стойкость модифицированной древесины в подземных сооружениях. Технология строительства сельскохозяйственных зданий и сооружений из местных материалов. НГАУ, 1997. С. 12–15.

160. Павлов А. И. Клееные судовые конструкции: научное пособие. Ленинград: Судостроение, 1965. 284с.

161. Панферов К.В. Деформации древесины под действием повторной статической нагрузки при сжатии вдоль волокон. Вопросы прочности и изготовления деревянных конструкций. Москва, 1952. С. 48–67.

162. Паншин Б. И. Механические испытания клеевых соединений. Клеи и технология склеивания. Москва: Лесная промышленность, 1960. 126с.

163. Патент на винахід №40068 А України «Спосіб ізоляції і зміцнення та полімерна композиція для його здійснення “СИЛОР”», 16.07.2001 р., Бюл. №6.

164. Пауль Э.Э., Вихров В.Е. О применении модифицированной древесины в градирнях. Модификация древесины синтетическими полимерами. Минск, 1973. С. 95-99.

165. Перельгин Л.М. Влияние скорости нагружения при механических испытаниях древесины. Заводская лаборатория. 1938. №1. С. 120–132.

166. Пінчевська О.О., Буйських Н.В., Головач В.М. Ефективність використання низько товарних круглих лісоматеріалів з деревини сосни: монографія. Харків, 2015. 160 с.

167. Пінчевська О. О., Головач В.М., Горбачова О.Ю. Деякі фізико-механічні властивості термомодифікованої деревини. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, 2014. Вип. 147. С. 3–9.

168. Поберейко Б.П. Теоретичні основи розрахунку короткочасної міцності деревини. Науковий вісник НЛТУ України. Львів, 2014. Вип.24.2. С. 333–337.

169. Поберейко Б.П., Соколовський Я.І. Критерій текучості деревини. Науковий вісник НЛТУ України. Львів, 2009. Вип.19.2. С. 285–290.

170. Поберейко Б.П., Флуд Л.О. Анізотропія та асиметрія міцності деревини. Науковий вісник НЛТУ України. Львів, 2014. Вип. 24.6. С. 110–114.

171. Поветкин С.В., Борков П.В., Бондарев А.Б. Трещиностойкость деревянных элементов конструкций транспортных сооружений на лесовозных железных дорогах. Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. 2009. Вып. 16(35). С. 40–45.

172. Покровская Е.Н., Дмитриев В.В., Ковальчук Ю.Л., Чистов И.Н. Химико-микробиологические исследования древесины свай в основании фундаментов исторических зданий и сооружений. Строительные материалы. Москва, 2009. № 1. С. 56–57.

173. Попов В.М., Иванов А.В., Платонов А.Д., Шендриков А.М. Способ получения клееной древесины повышенной прочности. Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник, 2007. № 6. С. 123–125.

174. Пятикрестовский К.П. Силовое сопротивление пространственных деревянных конструкций при кратковременных и длительных нагрузках: дис... докт. техн. наук: 05.23.01. Москва, 2011. 320с.

175. Пятикрестовский К.П. Обоснование зависимостей между интенсивностями напряжений и деформаций для нелинейного расчета деревянных конструкций. Строительная механика и расчет сооружений, 2011. №1. С.62–69.

176. Рабинович А.Л. Об упругих постоянных и прочности авиационных материалов. Тр. ЦАГИ, 1946. № 582. С. 1–56.

177. Рафаилов В.Г. Оценка концентрации напряжений с помощью аппроксимации кривой деформирования материала. Пространственные конструкции в Красноярско крае. Красноярск, 1985. С. 108–113.

178. Роговий С.І. Методологія оцінки міцності нормальних перерізів бетонних і залізобетонних конструкцій на основі деформаційної розрахункової моделі: дис. ... докт. техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2005. 371 с.

179. Родин Б.Е. Влияние влажности на прочность, деформативность и несущую способность элементов деревянных конструкций. Строительные конструкции и строительная механика. Саранск, 1969. С. 64–97.

180. Ромашко В.М. Деформаційно-силова модель опору бетону та залізобетону: монографія. Рівне, 2016. 424 с.

181. Рощина С.И. Прочность и деформативность клееных армированных деревянных конструкций при длительном действии нагрузки: дисс. ... докт. техн. наук: 05.23.01. Москва, 2009. 330 с.

182. Рудяк Ю.А, Підгурський М.М. Оптичні експериментально-розрахункові методи визначення НДС та граничного стану багатошарових структур з концентраторам. Вісник Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль: ТНТУ, 2014. №1. С. 11–21.

183. Румянцев М.В. Определение показателей оценки качества клееной древесины с учетом дефектов склеивания: дисс. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Архангельск, 2002. 176 с.

184. Савицкий Н.В., Веселовский Р.А., Веселовский Д.Р., Пеший И.В. Восстановление мостовых переходов полимерными материалами. Строительство. Материаловедение. Машиностроение: Сб. научн. трудов. Днепропетровск: ПГАСА, 2005. Вып.35. Ч.1. С. 100–104.

185. Савицкий Н.В., Веселовский Д.Р., Веселовский Р.А. Основные принципы создания мономеров для пропитки бетона. Строительство. Материаловедение. Машиностроение: Сб. научн. тр. Днепропетровск: ПГАСА, 2005. Вып.35. Ч.1. С. 105–108.

186. Санжаровский Р.С., Вареник А.С., Вареник К.А. Устойчивость сжатых деревянных конструкций с учетом мгновенной нелинейности и нелинейной ползучести. Научное обозрение, 2014. №8(2). С. 572–575.

187. Сасовський Т.А. Витривалість деревини малоцикловим повторним навантаженням при роботі на стиск поперек волокон. Устойчивое развитие городов. Харків: ХНАГХ, 2011. Часть 1. С. 131–132

188. Сасовський Т.А. Напружено-деформований стан балок із клеєної деревини за дії малоциклових навантажень: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Рівне, 2018. 200 с.

189. Сашин М.А., Киселева О.А., Ярцев В.П. Прочность и химическая стойкость модифицированной древесины. Труды ТГТУ. Тамбов, 2004. Вып. 16. С. 10–13.

190. Сашин М.А. Прогнозирование и повышение долговечности и длительной прочности древесины в строительных изделиях и конструкциях: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Тамбов, 2006. 182 с.

191. Свенцицкий Г.В. О пределе пластического течения при поперечном изгибе и при сжатии с изгибом. Сборник ЦНИПС. Вопросы прочности и изготовления деревянных конструкций. 1952. С. 69–74.

192. Северденко, В.П., Скрипниченко А.Л. Ультразвук и прочность: научное пособие. Москва: Наука и техника, 1979. 340с.

193. Сморгков А.А., Прокофьев А.С., Фрейдин А.С. Влияние коэффициента асимметрии цикла на предел выносливости клееных деревянных балок: рекомендации. Москва: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1955. 25 с.

194. Сморгков А.А. Выносливость и виброползучесть клеёных деревянных балок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Москва: МИСИ, 1982. 21 с.

195. Сморгков А.А., Дедова М.И., Чаплыгин Н.А. Кинетические параметры деформирования древесины. Тезисы докладов юбилейной конференции ученых Курского политехнического института. Курск: КПП1, 1994. С. 161–162.

196. Сморгков А.А., Поветкин СВ., Чаплыгин Н.А., Дедова М.И. Предельные границы деформирования элементов из клеёной древесины Юбилейная научная конференция, посвященная 50-летию Победы в ВОВ 1941-1945 г.г.: Труды молодых ученых. Курск: Курский ГТУ, 1995. Ч. 2. С. 124–125.

197. Сморгков А.А. Парфенов С.Г. Деформирование конструкций изклееной древесины при циклическом нагружении. Повышение качества

строительных работ, материалов и проектных решений: Сб. науч. трудов. Брянск: Брянская ГИТА, 1998. Вып. 1. С. 168–172.

198. Серов Е.Н. Рациональное использование анизотропии прочности материалов в клеёных деревянных конструкциях массового изготовления: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Ленинград: ЛИСИ, 1989. 48 с.

199. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции. Москва: Стройиздат, 1982. 66 с.

200. Соболев Ю.С. Древесина как конструкционный материал. Москва: Изд-во "Лесн. пром-сть", 1979. 248 с.

201. Соколовський Я.І., Прусак Ю.В., Крошний І.М. Дослідження пружнов'язкопластичного стану деревини у процесі сушіння. Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково технічних праць. Львів, 2014. Вип. 24. С. 118-130.

202. Соколовський Я.І., Прусак Ю.В. Моделювання в'язкопружного стану деревини у процесі сушіння з врахуванням анізотропії тепломеханічних властивостей. Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць. Львів: НЛТУ України, 2015. Вип. 15.4. С. 121–133.

203. Соломенцев Б.А. Исследование влияния скорости нагружения на прочность и деформативность древесины сосны на сжатие вдоль волокон. Сборник НИИ по строительству. Москва: Госстройиздат, 1958. С. 104–119.

204. Стоянов В.В., Давиденко О.И. Підвищення міцності й деформативності дерев'яних балок. Сучасне промислове та цивільне будівництво. Донецьк, 2009. Том 5. №1. С. 23–27.

205. Сурмай М.І. Міцність та деформативність дощатоклеєних балок армованих склопластиковою та базальтовою арматурою: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Львів, 2015. 185с.

206. Сюй Юнь. Повышение несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках с использованием металлической зубчатой пластины: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Санкт-Петербург, 2015. 198 с.

207. ТУ У 24.1-19478158-001-2004. Композиція полімерна. Технічні умови.
208. ТУ У В.2.7. – 24.6-01497391-001-2001 "Покриття захисне комбіноване на основі зв'язуючих "Силор" і "УТК-М".
209. Тутурин С.В., Короткина М.Р. Влияние масштабного фактора на прочность древесины. Вестник МГУЛ. Лесной вестник. Москва, 2004. №3(34). С. 186–194.
210. Тутурин С.В. Механическая прочность древесины: дис. ... докт. техн. наук: 01.02.04. Москва, 2005. 318с.
211. Тутурин С. В., Шемякин Е.И., Короткина М.Р. Разрушение древесины при сжатии. Вестник Московского государственного университета леса. Москва: 2005. №3(39). С. 56–71.
212. Тынный О.Н. Прочность и разрушение полимеров при воздействии жидких сред: научное пособие. Киев: Наукова думка, 1975. 206 с.
213. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами товароведения: учебник. Москва: Изд-во МГУД, 2002. 340 с.
214. Успенская Н.А. Совершенствование системы контроля качества прочности клеевых соединений деревянных строительных конструкций: дис. ...канд. техн. наук: 05.23.01. Москва, 2015. 166с.
215. Федосеенко И.Г. Влияние влажности на прочность при статическом изгибе уменьшенных образцов древесины. Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. Минск, 2011. №2. С. 208–211.
216. Флаксерман А.Н. Влияние наклона волокон на механические свойства древесины сосны. Труды ЦАГИ, 1931. Вып. 78.
217. Флуд Л.О. Побудова критерію тривалої міцності для деревини. Науковий вісник НЛТУ України. Львів, 2011. Вип.21.7. С. 98-102.
218. Фрейдин А.С. Прочность и долговечность клеевых соединений: научное пособие. Москва: Химия, 1981. – 272 с.
219. Фрейдин А.С., Вуба К.Т. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины: монография. Москва: Лесная пром-сть, 1980. 224 с.

220. Фурсов В. В. Працездатність дерев'яних конструкцій під впливом різноманітних навантажень та експлуатаційного середовища: дис. ... докт. техн. наук: 05.23.01. Полтава, 1996. 438 с.

221. Фурсов В. В., Пурызданхах М. Экспериментальное исследование натуральных балок из клееной древесины. Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. Київ, 2013. №12. С. 71–77.

222. Хофф Н. Продольный изгиб и устойчивость: научное пособие Москва: Издательство иностранной литературы, 1955. 155 с.

223. Храмцов Ю.Д. Исследование упругих и прочностных свойств ацетилированной древесины при термоуплотнение: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04. Пермь, 1997. 19с.

224. Хрулев В.М. Долговечность клееной древесины: научное пособие. Москва: Стройиздат, 1971. 112 с.

225. Хрулев В.М., Шутов Г.М., Мельников Е.Г., Ханеня Г.П. Применение опалубки из модифицированной древесины и пластмасс: научное пособие. Минск, 1974. 54 с.

226. Хрулёв В.М., Арисланов О.И. Исследование усадочных напряжений в клеевых соединениях модифицированной древесины. Строительство и архитектура, 1982. №2. С. 5–8.

227. Хрулев В.М., Машкин Н.А. Стойкость модифицированной древесины к циклическим температурно-влажностным воздействиям. Известие вузов. Лесной журнал. Новосибирск, 1986. №5. С. 86-91.

228. Хрулев В.М., Машкин Н.А., Токтогожаев М.А. Стойкость древесины в нагруженном состоянии при воздействии агрессивных сред. Повышение эксплуатационной надежности и защита древесины. Архангельск, 1987. С. 56–63.

229. Хрулев В.М. Модифицированная древесина в строительстве: научное пособие. Москва: Стройиздат, 1986. 112 с.

230. Хрулев В.М., Мартынов К.Я., Лукачев С.В., Шутов Г.М. Деревянные конструкции и детали: научное пособие. Москва: Стройиздат, 1985. 384 с.
231. Хухрянский П.Н. Прочность древесины: научное пособие. Москва, 1955. 152 с.
232. Цапко Ю.В. Дослідження поверхневих властивостей модифікованої деревини. Вісник ОДАБА. Одеса, 2014. Вип. 53. С. 411–417.
233. Цапко Ю.В., Ліхнівський Р.В. Дослідження структури модифікованої деревини. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Київ, 2013. Вип. 49. С. 170–174.
234. Шамаев В.А. Модификация лиственной древесины: Москва: ВНИПИЭИлеспром, 1980. С. 1-32.
235. Шамаев В.А. Модификация древесины: научное пособие. Москва: Экология, 1991. 128 с.
236. Шваб'юк В.І., Ротко С.В., Ужегова О.А., Кислюк Д.Я. До проблеми визначення залишкової міцності балок, пошкоджених тріщинами. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Вип. 12. Луцьк, 2019. С. 229–236.
237. Шейкин А.Е. К вопросу прочности, упругости и пластичности бетона. Строительная механика и мосты. Москва: Трансжелдориздат, 1946. Выпуск 69. С. 48-52.
238. Шемякин Е.И., Тутурин С.В., Короткина М.Р. Разрушение древесины при сжатии. Вестник МГУЛ. Лесной вестник. Москва, 2005. №3. С.56–70.
239. Шостачук Ю.М. Напружений стан та руйнування деревини дуба при конвективно-надвисокочастотному сушінні: : автореф. дис. ...канд. техн. наук: 01.02.04. Тернопіль, 2003. 20с.
240. Чаусов М. Г., Бойко Л.М., Грабар І.Г. Експрес-метод визначення термоактиваційних параметрів при прогнозуванні довговічності виробів із композиційних матеріалів на основі деревини. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. Київ, 2016. Вип. 255. С. 286–295.

241. Юськевич Т.Я. Механічні властивості деревини інтродукованих видів сосни. Науковий вісник НЛТУ України. Львів, 2013. Вип. 23.3. С. 166–170.

242. Ясній П.В., Гомон С.С., Дмитрук В.П. Міцність та деформівність деревини модрина з різним показником вологості за жорсткого режиму випробувань. *SCIENCE, SOCIETY, EDUCATION: TOPICAL ISSUES AND DEVELOPMENT PROSPECTS*. Abstracts of VI International Scientific and Practical Conference, Kharkiv, 10-12 May 2020. P. 319–322.

243. Ясній П.В., Гомон С.С., Дмитрук В.П. Особливості побудови повних діаграм деформування деревини ясена за жорсткого режиму навантажень. Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: матеріали міжнародної науково-практичної конференції до 60 річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175 річчя з дня народження Івана Пулюя, м. Тернопіль, 14–15 травня 2020 р. Тернопіль: ТНТУ, 2020. С. 51.

244. Ясній П.В., Гомон С.С. Дослідження січних модулів листяних та хвойних порід деревини з різним показником вологості. Вісник Вінницького політехнічного інституту. Вінниця: ВНТУ, 2020. Вип. 4 (151). С. 125–130.

245. Ясній П.В., Гомон С.С. Експериментальні дослідження суцільної деревини конструкційних розмірів з врахуванням фактора вологості. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Вінниця: ВНТУ, 2020. Том 28. №1. С. 41–48.

246. Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщиностійкість: монографія. Львів, 1998. 291 с.

247. ANSI/AF&PA NDS. National design specification for wood construction. American Forest and Paper Association. Washington, DC, 2012.

248. ASTM D 143-14. Standart test methods for small clear specimens of timber. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2014.

249. Bach G. Untersuchungen von Granit inbezug auf Zug-, Druck-, Biegungs- und Schubfestigkeit, sowie in Hinsicht auf Zug-, Druck- und Biegeelastizität. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, Band XXXXI, №9, 1897. – P. 241–252.

250. Baes L., Vandeperre L. Compression simple et flambement des pillers en beton arme. *Congres International pour l'essai des materiaux*, 1928. P. 18–31.
251. Barret J. D., Foschi R. O. Duration of load and probability of failure of wood. Part 1. Modelling creep rupture. *Can. J. of Civil Engineering*, 1978. №4. P. 505–514.
252. Barrett D. & Foschi R.O. On the application of brittle fracture theory, fracture mechanics and creep-rupture models for the prediction of the reliability of wood structural elements. *Proc. Of the First International Conference on Wood Fracture*, Forintek Canada Corp., Vancouver, Canada, 1978. Pp. 1–37.
253. Baumann R., Lang G. *Das Holz als Bausstoff*. 1927. P. 48-53.
254. Bazan I.M. Ultimate bending strength of timber beams. Ph.D. Dissertation. Nova Scotia Technology College. Halifax. Nova Scotia, 1980.
255. Blass, Hans Joachim, Laskewitz Bernd: Tragfähigkeit von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln und Zwischenschichten, Erschienen in *Bauen mit Holz*, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften (BGU) Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (VAKA), Jahr 2003, Seitenangabe: 26–35.
256. Brandner R. Stochastic System Action and Effects in Engineered Timber Products and Structures. Dissertation in Bearbeitung, voraussichtliche Fertigstellung, 2012.
257. Boontanjay, C. Fracture toughness of New Zealand pinus radiata. ME Thesis, University of Auckland, New Zealand, 1979.
258. Ceccotti A., Lauriola M. P., Pinna M., Sandhaas C., SOFIE Project – Cyclic Tests on Cross-Laminated Wooden Panels, *Proceedings WCTE*, Portland, USA, 2006.
259. Chen W.F., Atsuta T. *Theory of beam-columns in-plane behaviour and design*. MC-Graw-Hill. New-York, 1976. Vol.1.
260. Conrad M.P., Smith G.D., Ferrlund G. Fracture of soil wood: A review of structure and properties at different length scales. *Wood and Filer Science*. 2003, 35. № 4. P. 570–584.

261. Da Silva A, Kyrakides S. Compressive response and failure of balsa wood. *International Journal of Solids and Structures*. Volume 44. Issues 25–26. P. 8685–8717.
262. Davids W.G., Landis E.N., Vasic S. Lattice models for the prediction of load-induced failure and damage in wood. *Wood Fiber Sci*, 2003. №35. Pp. 120–135.
263. De Bonis A. Rate of loading influence on southern pine 2 by 4 s bending. *Forest Products Journal*, 1980, №11, P. 34–37.
264. Distefano N. *Nonlinear processes in engineering*. N.Y.– London: Academic Press, 1974. 380 p.
265. Dutko P. *Drevené konštrukcie*. Bratislava: ALFA, 1976. 460 p.
266. Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings. 1995. 124 p.
267. Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1. 2001. 274 p.
268. Everard N. *Ultimate Strength Design Service – ability. A Unified Method on Reinforced Concrete Bridge Design: monograph*. Proceedings International Symposium on Bridge Design (Toronto, Ontario, Canada). ACI Special Publication, 1969. P. 385–405.
269. Galicki J., Czech M. Tensile strength of softwood in LR orthotropy plane. *Mechanics of Materials*, 2005. 37(6). Pp. 667–686.
270. Gomon S., Gomon S., Gomon P., Shkirenko S. The Basis of the Deformation Method for Calculating of Elements from Wood under Cross-Section Bending. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol.7 (4.8). P. 109-114.
271. Gomon S., Gomon S., Karavan V., Gomon P., Sobczak-Piastka J. Investigation of solid and glued wood on the effect of variables of low-cycle repeated loads. *AIP Conference Proceedings* 2077, 020020 (2019).
272. Gomon S., Gomon S., Polishchuk M. Experimental and statistical investigation of the secant modulus of elasticity of glued timber modified with polymer “Silor”. *Proceedings of the 1st Eastern Europe Conference on Timber Constructions*. Kharkiv – “Madrid” Typography, 2018. P. 137–142.

273. Gomon S.S. Fluence of age factor on main strength and deformative properties of timber. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк, 2020. Вип.13. С. 35–41.

274. Gomon S.S., Pilipaka L.M. Experimental studies of the glued wood strength and deformation properties under the hard test mode. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Київ, 2020. Том 31 (70). № 3. С. 130–135

275. Gomon S.S., Pilipaka L.M. Universal method for determining the modules of deformation of solid wood and composite materials based on it. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки». Рівне: НУВГП, 2020. Випуск 2(90). С. 168–178.

276. Gomon S.S., Savchuck V.O., Melnyk Yu.A., Vereshko O.V. Modern testing machines for investigation of wood and timber-based composite materials. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк, 2020. Вип.14. С. 73–80.

277. Green D.W., Kretschmann D.E. Properties and grading of Southern Pine Timbers. Forest Products Journal, 1992. 47 (9). P. 78–85.

278. Gu H., Zink-Sharp A., Sell J. Hypothesis of the role of cell wall structure in differential transverse shrinkage of wood. Holz Roh Werkst, 2001. №59. Pp. 436–442.

279. Jockwer R., Streiger R., Flangi A. State-of-the-art review of approaches for the design of timber beams with notches. Journal of Structural Engineering (United States) (2014). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000838.

280. Johansen, K. W.: Theory of Timber Connections. In: International Association of Bridge and Structural Engineering, 1949.

281. Hanhijärvi A. Modelling of creep deformation mechanisms in wood. VTT-Publications 231, VTT, Espoo: Technical Research Center of Finland, 1995.

282. Huang D., Zhou A., Bian Y. Experimental and analytical study nonlinear bending of parallel strand bamboo beams. Construction and Buildings Materials, 2013. 35(3). Pp. 585–592.

283. Huang D., Bian Y., Zhou A., Sheng B. Experimental study on stress-strain relationships and failure mechanisms of parallel strand bamboo from *phyllostachys*. *Construction and Buildings Materials*, 2015(77). Pp. 130–138.
284. Huang D., Bian Y., Zhou A., Sheng B. An ultimate based model inelastic analysis of intermediate slenderness PSB columns under eccentrically compressive load. *Construction and Buildings Materials*, 2015(94). Pp. 306–314.
285. Huang Z., Chen Z., Huang D., Zhou A. The ultimate load-carrying capacity and deformation of laminated bamboo hollow desks: Experimental investigation and inelastic analysis. *Construction and Buildings Materials*, 2016(117). Pp. 190–197.
286. Kälsner B., Noren B. Strength of a wood column in combined compression and bending with respect to creep. Paper 5-9-1, CIB-W18 Meeting 5. Karlsruhe, 1975.
287. King M.J., Sutherland I.J., Le-Ngoc L. Fracture toughness of wet and dry *Pinus radiata*. *Holz Roh Werkst.* 1999 (57). Pp. 235–240.
288. Kollmann F. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Bd. I. Berlin, 1951. 1050 s.
290. Kretschmann D.E., Green D.W. Moisture content specific gravity relationships for clear southern pine. In: *Proceedings of the International Wood Engineering Conference*, October 28–31, New Orleans, LA, Vol. 2. Louisiana State University, Baton Rouge, 1996. Pp. 536–542.
291. Kuffner M. Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit von Holz Verschiedenen Rohdichte in Abhängigkeit von Feuchtigkeitgehalt. *Holz als Roh und Werkstoff*, 1978, 11, S. 435–440.
292. Landis E.N., Vasic S., Davids W.G., Parrod P. (2002) Coupled experiments and simulations of microstructural damage in wood. *Exp. Mech*, 2002 (42). P. 389–394.
293. Neely S.T. Relation of compression-edwise to breaking load of beams in: *Progress in Timber Physics*, USDA, Forest Service, Washington D.C., 1898. Pp. 13–17.

294. Mackenzie-Helnwein P., Eberhardsteiner J., Mang H. A multi-surface plasticity model for clear wood and its application to the finite element analysis of structural details. *Comput Mech.* 2003. № 1-2. P. 204–218.
295. Madsen B. Duration of load test for wood in tension perpendicular to grain. *Forest Products Journal*, 1975. V. 25. №8. P. 48–54.
296. Madsen B. Recommended moisture adjustment factor for lumber stresses. *Can. J. Civil Engineering*. 1982. Vol. 9. №4. P. 602–610.
297. Madsen B. Structural behaviour of timber. Timber Engineering Ltd. Vancouver, Canada, 1992. 440 p.
298. Mårtensson A. Mechanical behavior of wood exposed to humidity variations. Thesis, Report TVBK-1006, Lund Institute of Technology, Dept. Struct. Eng., Sweden, 1992. 189 p.
299. Mindness S., Madison B. & Barrett J.D. Rate of loading and duration of load tests on Douglas-fir in tension perpendicular to the grain. Proc. First International Conference on Wood Fracture, Forintek Canada Corp., Vancouver, Canada, 1978. Pp. 143–157.
300. Moosbrugger T., Guggenberger W., Bogensperger T. Cross-Laminated Timber Wall Segments under homogeneous Shear – with and without Openings. WCTE 2006, 9th World Conference on Timber Engineering, 2006. Seite: 72 (1–10).
301. Moses D.M., Piron H.G. Stress and failure analysis of wood composite: A new model. *Composites Part B. Engineering* 35(3). P. 251–261.
302. Patton-Mallory M. & Cramer S. Fracture mechanics: a tool for predicting wood component strength. *Forest Products Journal*, 1987. 37(7/8). Pp. 39–47.
303. Pinchevska O., Sedliačik J., Horbachova O., Spirochkin A., Rohovskyi I. Properties of hornbeam (*Carpinus betulus*) wood thermally treated under different conditions. *ACTA FACULTATIS XYLOLOGIAE ZVOLEN*, 61(2): 25–39, 2019.
304. Prager W. Über die Querschnittbemessung zweigurtiger Holzholme // *Z.F.M.* 1933. №19. S.197–201.

305. Prager W. Ein neues Verfahren zur Bemessung auf Biegung beanspruchter Holzstäbe // Schweizerische Bauzeitung. 1934. Bd.104. №18. S. 201–202.

306. Prokopski G. Investigation of wood fracture toughness using mode II (shearing). *Journal of the Materials Science*, 1995. №30. Pp. 4745–4750.

307. Ramos A.N. Stress-strain distribution in douglas-fir beams within the plastic range. Report No.2231. U.S. Department of Agriculture Forest Products. Laboratory Madison, WI, 1961.

308. Reiterer A., Sinn G., Stanzl-Tschegg S. Fracture characteristics of different wood species under mode I loading perpendicular to the grain. *Materials Science and Engineering*, 2002. №332. P. 29–36.

309. Saint-Venant B. Memoire sur l'impulsion transversal et la resistance vive des barres elastiques appuyees aux extremités. *Comptes rendus*. T.14, 1857. P. 204–208.

310. Samarasinghe S. Exploration of fracture dynamics properties and predicting fracture toughness of individual wood beams using neural networks. *Silva Fennica*, 2009. 43(2). Pp. 275–289.

311. Schänzlin, J. Modeling the long-term behavior of structural timber for typical service class-II-conditions in South-West Germany. Habilitation. Mitteilung des Instituts für Konstruktion und Entwurf, Nr. 2010-2 Institut für Konstruktion und Entwurf; Stuttgart, 2010. 185 s.

312. Schniewind, A.P., Bartels, H.J. & Gammon, B.W. Effect of pre-loading on fracture toughness of wood. Proc. of 1st International Conference on Wood Fracture, Forintek Canada Corp., Vancouver, Canada, 1978. Pp. 227–238.

313. Shiraishi N., Yoshioka M. Plasticization of wood by acetylation with trifluoroacetic acid pretreatment. *J. Soc. Fiber Sci. and Technol. Jap.* 1986. 42.6. P. 84–93.

314. Sinha A., Nairn J.A., Gupta R. The effect of elevated temperature exposure on the fracture toughness of solid wood and structural wood composites. *Wood Science and Technology*. Vol. 46. Issue 4. Pp. 1127–1149.

315. Sinha B.P., Gerstle K.H., Tulin L.G. Stress-strain relations for concrete under cyclic loadings. *ACI Journal*, Vol.61, №2, 1964. P.195–212.
316. Sippola M., Koponen S. Fracture behaviour of clear softwood - Tests and FEM models. In: *COST – Action E8: Damage in Wood*, Bordeaux. Eds. Morlier, P., Valentin, G, 1999. Pp.207–221.
317. Smith F.W., Penney D.T. Fracture mechanics analysis of butt joints in laminated wood beams. *Wood Science*, 1978. VI2.
318. Smith, I., Vasic, S. Fracture behaviour of softwood. *Mech. Mater*, 2003 (35). Pp. 803–815.
319. Sobczak-Piąstka J., Gomon S.S., Polishchuk M., Homon S., Gomon P., Karavan V. Deformability of Glued Laminated Beams with Combined Reinforcement. *Buildings* 2020, 10, 92.
320. Sokolovskyy Ya., Storozhuk O. Mathematical Modeling of Reological behavior of Capillary Porous materials with fractal Structure during drying. *Sustainable Resources and Technology for Forest Products. Proceedings of the 57-th SWST International Convection and 7th Wood structure and Properties Conference and 6th European Hardcoord Conference*, June 23-27, 2014, Technical University in Zvolen, Slovakia.
321. Stanzl-Tschegg S.E., Tan D.M., Tschegg E.K. New splitting method for wood fracture characterization. *Wood Sci. Technol*, 1995(29). Pp. 31–50.
322. Stanzl-Tschegg S.E., Tan D., Tschegg E.K. Fracture resistance to the crack propagation in wood. *International journal of fracture*.75,1996.
323. Sturman G.M., Shah S.P., Winter G. Effect of flexural strain gradients on micro cracking and stress-strain behavior of concrete. *ACI Journal*. Vol.62. №3, 1965. P. 805–822.
324. Taylor S., Bender D. Comparing length effect models for lumber tensile strength. *Forest Products Journal*, 1992. №2. P. 23–29.
325. Thuuel B. On the Premises for Mechanical grading of Timber. *Paperi ja puu*, 1969. T. 51. №4. P. 373–377.

326. Toratti T. Creep of timber beams in a variable environment. Ph.D. Thesis, Helsinki University of Technology, 1992. 182 s.
327. Vasic, S., Smith, I. (2002) Bridging crack model for fracture of spruce. Eng. Fract. Mech, 2002(69). Pp. 745–760.
328. Vasic S., Smith I. Bridging crack model for fracture of spruce. Engineering Fracture Mechanics, 2002. №69. P. 745–760.
329. Vasic S., Stanzl-Tschegg S. Experimental and numerical investigation of wood fracture mechanisms at different humidity levels. Holzforschung. Berlin, New York, 2007. Vol. 61. Pp. 367–374.
330. Wadso, L. Studies of water vapor transport and sorption in wood. Doctoral dissertation. Report TVBM-1013. Building Materials, Lund University, Lund, Sweden, 1993.
331. Wagenfuhr R. Anatomie des Holz. Berlin, 1989.
332. Wang L.Y., Lu Z.Y., Zhao G.J. Wood fracture pattern during the water adsorption process. Holzforschung, 2003(57). Pp. 639–643.
333. Whale, L. R. J., Smith, I. Mechanical Timber Joints, Research Report 18/86. Timber Research and Development Association TRADA: USA, 1986.
335. Wilson E., Mohammadi M.S., Nairn J.A. Crack propagation fracture toughness of several wood species. Wood Science & Engineering, Oregon State University, Corvallis, OR, USA, 2013. 15 p.
335. Yasniy P. V. et al. Microcrack initiation and growth in heat-resistant 15Kh2MFA steel under cyclic deformation. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. Blackwell Science Ltd, 2005. Vol. 28. № 4. P. 391–397.
336. Yasniy P. et al. Calculation of constructive parameters of SMA damper. Scientific Journal of TNTU. Ternopil: TNTU, 2017. Vol. 88. № 4. P. 7 – 15.
337. Yasniy P., Gomon S., Gomon P. On approximation of mechanical condition diagrams of coniferous and deciduous wood species on compression along the fibers. Scientific Journal of Ternopil National Technical University. Ternopil: TNTU, 2020. Vol 97. No 1. P. 57–64.

338. Yasniy P., Gomon S. Timber with improved strength and deformable properties. Scientific Journal of Ternopil National Technical University. Ternopil: TNTU, 2020. Vol 99. No3. P. 17–27.

339. Ylinen A. Über die Bestimmung der zeitbedingten elastischen und Festigkeitseigenschaften des Holzes mit Hilfe eines allgemeinen nichtlinear viskoelastischen reologischen Modelles // Holz als Roh- und Werkstoff. 1965. V.23. №5. S. 193-196.

340. Zakic B.D. Inelastic bending of wood beams. Journal of the Structural Division, 1974. 99. Pp. 2079–2092.

341. Zhou A., Bian Y., Shen Y., Huang D., Zhou M. Inelastic bending performances of laminated bamboo beams: experimental investigation and analytical study. Bio Resources, 2018. 13(1). P. 131–146.

Додаток А

Додаток А1

Визначення критичних деформацій стиску вздовж волокон деревини деяких листяних порід, які вирощені в Україні

№	Порода деревини	E_0 , МПа	$f_{c,0,d}$ МПа	Критичні деформації стиску вздовж волокон, мм/мм		
				Пружні $u_{c,el}$	Пластичні $u_{c,pl}$	Сумарні $u_{c,0,d}$
1	Акація біла	16000	73,3	0,00458	0,00352	0,00810
2	Береза пухнаста	12300*	47,2	0,00384	0,00146	0,00530
3	Вільха чорна	11200	43,6	0,00389	0,00125	0,00514
4	Осика	11300	44,7	0,00396	0,00131	0,00527
5	Тополя чорна	15200	48,7	0,00320	0,00155	0,00475
6	Ясен звичайний	16000*	55,9	0,00349	0,00205	0,00554

Примітки: * початковий модуль пружності визначений за нашими експериментальними дослідженнями

Додаток А2

Визначення критичних деформацій стиску вздовж волокон деревини деяких хвойних порід, які вирощені в Україні

№	Порода деревини	E_0 , МПа	$f_{c,0,d}$ МПа	Критичні деформації стиску вздовж волокон, мм/мм		
				Пружні $u_{c,el}$	Пластичні $u_{c,pl}$	Сумарні $u_{c,0,d}$
1	Модрина Європейська	11700	47	0,00402	0,00145	0,00547
2	Сосна звичайна	12400	44	0,00355	0,00127	0,00482
3	Ялина звичайна	14400*	44	0,00306	0,00127	0,00433
4	Ялиця Біла	10600	44	0,00415	0,00127	0,00542

Примітки: * початковий модуль пружності визначений за нашими експериментальними дослідженнями.

Додаток А3

Визначення критичних деформацій стиску вздовж волокон деревини листяних порід, які вирощені в Центральній та Східній частині Європи

№	Порода деревини	Країна походження	E_0 , МПа	$f_{c,0,d}$ МПа	Пружні $u_{c,el}$	Пластичні $u_{c,pl}$	Сумарні $u_{c,0,d}$
1	Акація біла	Грузія	16500	73,3	0,00444	0,00352	0,00796
2	Береза пухнаста	Росія	14200	55,4	0,0039	0,00201	0,00591
3	Береза Шмідта	Росія	16700	81,7	0,00489	0,00437	0,00926
4	Береза ребриста	Росія	12600	60	0,00476	0,00236	0,00712
5	Бук Східний	Азербайджан	11700	55,1	0,00471	0,00199	0,0067
6	Бук Східний	Вірменія	12900	53,5	0,00415	0,00187	0,00602
7	Бук Лісний	Латвія	11400	57	0,005	0,00213	0,00713
8	В'яз шершавий	Азербайджан	10100	50	0,00495	0,00164	0,00659
9	Граб кавказький	Азербайджан	12200	55,4	0,00454	0,00201	0,00655
10	Граб кавказький	Вірменія	12000	73,5	0,00613	0,00354	0,00966
11	Граб звичайний	Росія	14900	61,5	0,00413	0,00248	0,0066

12	Граб звичайний	Вірменія	13500	63,8	0,00473	0,00267	0,00739
13	Граб звичайний	Білорусь	13500	55,8	0,00413	0,00204	0,00617
14	Граб звичайний	Латвія	10600	54,3	0,00512	0,00193	0,00705
15	Дуб червоний	Латвія	13100	61,6	0,0047	0,00249	0,00719
16	Дуб черешчатий	Росія	10700	58,5	0,00547	0,00224	0,00771
17	Дуб черешчатий	Білорусь	11500	56,7	0,00493	0,00211	0,00704
18	Залізне дерево	Азербайджан	10200	58,8	0,00576	0,00226	0,00803
19	Іва біла	Росія	9000	35,3	0,00392	0,00082	0,00474
20	Каштан	Росія	9260	45,7	0,00494	0,00137	0,0063
21	Клен	Росія	12000	57,6	0,0048	0,00217	0,00697
22	Клен	Білорусь	14000	60,6	0,00433	0,00241	0,00673
23	Липа амурська	Росія	7520	38,5	0,00512	0,00097	0,00609
24	Липа	Азербайджан	10800	49	0,00454	0,00157	0,00611
25	Липа	Росія	7100	42,5	0,00599	0,00118	0,00717
26	Вільха серцелиста	Азербайджан	8810	42,5	0,00482	0,00118	0,00601
27	Вільха чорна	Білорусь	8100	43,9	0,00542	0,00126	0,00668
28	Осика	Росія	12400	44,7	0,0036	0,00131	0,00491
29	Осика	Білорусь	9760	42,3	0,00433	0,00117	0,00551
30	Горобина	Росія	12800	56,5	0,00441	0,00209	0,0065

31	Тополя біла	Росія	8270	35,6	0,0043	0,00083	0,00513
32	Тополя канадська	Росія	9730	41,4	0,00425	0,00112	0,00538
33	Тополя	Росія	11100	40,5	0,00365	0,00107	0,00472
34	Тополя чорна	Росія	8590	35,1	0,00409	0,00081	0,00489
35	Евкаліпт антибський	Грузія	6450	53,9	0,00836	0,0019	0,01026
36	Евкаліпт батумський	Грузія	8130	56	0,00689	0,00205	0,00894
37	Евкаліпт Бріджеса	Грузія	7680	51,2	0,00667	0,00172	0,00838
38	Евкаліпт гігантський	Грузія	9170	56,7	0,00618	0,00211	0,00829
39	Евкаліпт Діна	Грузія	7910	49,4	0,00625	0,0016	0,00784
40	Евкаліпт Макартура	Грузія	8990	53,9	0,006	0,0019	0,0079
41	Евкаліпт попилястий	Грузія	8960	74,8	0,00835	0,00366	0,01201
42	Евкаліпт Стюарта	Грузія	7990	52,4	0,00656	0,0018	0,00836
43	Евкаліпт кульковий	Грузія	9850	56,5	0,00574	0,00209	0,00783
44	Ясен	Росія	13700	50,8	0,00371	0,00169	0,0054
45	Ясен звичайний	Білорусь	13000	57	0,00438	0,00213	0,00651
46	Ясен звичайний	Латвія	11000	50,5	0,00459	0,00167	0,00626

Додаток А4

Визначення критичних деформацій стиску вздовж волокон деревини хвойних порід, які вирощені в Центральній та Східній частині Європи

№	Порода деревини	Країна походження	E_0 , МПа	$f_{c,0,d}$, МПа	Пружні $u_{c,el}$	Пластичні $u_{c,pl}$	Сумарні $u_{c,0,d}$
1	Ялина звичайна	Білорусь	9690	43	0,00444	0,00121	0,00565
2	Ялина сибірська	Росія	10200	41	0,00402	0,0011	0,00512
3	Модрина даурська	Росія	13200	65	0,00492	0,00277	0,00769
4	Модрина сибірська	Росія	14900	58	0,00389	0,0022	0,0061
5	Модрина	Латвія	9630	57	0,00592	0,00213	0,00805
6	Ялиця біла	Латвія	8640	35	0,00405	0,0008	0,00485
7	Ялиця	Росія	11300	42	0,00372	0,00116	0,00487
8	Ялиця кавказька	Росія	10600	45	0,00425	0,00133	0,00557
9	Ялиця сибірська	Росія	9120	38	0,00417	0,00095	0,00511
10	Сосна кедрова	Росія	9820	41	0,00418	0,0011	0,00528
11	Сосна корейська	Росія	8060	39	0,00484	0,001	0,00583
12	Сосна звичайна	Росія,	13100	38	0,0029	0,00095	0,00385

13	Сосна звичайна	Росія, Сибір	12300	46	0,00374	0,00139	0,00513
14	Сосна звичайна	Латвія	12300	55	0,00447	0,00198	0,00645
15	Сосна звичайна	Білорусь	9750	44	0,00451	0,00127	0,00578
16	Сосна погребальна	Росія	9050	40	0,00442	0,00105	0,00547
17	Сосна чорна	Латвія	7420	47	0,00633	0,00145	0,00778

Додаток А5

Визначення критичних деформацій стиску вздовж волокон деревини листяних порід, які вирощені в Канаді та США

№	Порода деревини	E_0 , МПа	$f_{c,0,d}$ МПа	Пружні $u_{c,el}$	Пластичні $u_{c,pl}$	Сумарні $u_{c,0,d}$
1	Береза паперова	11000	39,2	0,00356	0,00101	0,00457
2	Береза жовта	13900	56,3	0,00405	0,00208	0,00613
3	Береза солodka	15000	58,9	0,00393	0,00227	0,0062
4	Бук американський	11900	50,3	0,00423	0,00166	0,00588
5	В'яз американський	9200	38,1	0,00414	0,00095	0,00509
6	В'яз червоний	10300	43,9	0,00426	0,00126	0,00552
7	В'яз скалистий	10600	48,6	0,00458	0,00155	0,00613
8	Гінкорн білий	15300	61,6	0,00403	0,00249	0,00651
9	Гінкорн водяний	13900	59,3	0,00427	0,0023	0,00657
10	Гінкорн косматий	14900	63,5	0,00426	0,00264	0,0069
11	Дуб бархатний	11300	45	0,00398	0,00133	0,00531

12	Дуб білий	12300	51,3	0,00417	0,00172	0,00589
13	Дуб болотяний	11900	47	0,00395	0,00145	0,0054
14	Дуб виргінський	13700	61,4	0,00448	0,00247	0,00695
15	Дуб каштановий	12200	50,1	0,00411	0,00164	0,00575
16	Дуб чорний	13900	46,7	0,00336	0,00143	0,00479
17	Іва чорна	7000	28,3	0,00404	0,00052	0,00457
18	Каштан американський	8500	36,7	0,00432	0,00088	0,0052
19	Клен червоний	11300	45,1	0,00399	0,00133	0,00532
20	Клен крупнолистний	10000	41	0,0041	0,0011	0,0052
21	Клен чорний	11200	46,1	0,00412	0,00139	0,00551
22	Липа американська	10100	32,6	0,00323	0,0007	0,00392
23	Магнолія	12500	43,5	0,00348	0,00124	0,00472
24	Нісса лісна	8300	38,1	0,00459	0,00095	0,00554
25	Вільха червона	9500	40,1	0,00422	0,00105	0,00527
26	Осика американська	8100	29,3	0,00362	0,00056	0,00418

27	Платан західний	9800	37,1	0,00379	0,0009	0,00469
28	Робінія	14100	70,2	0,00498	0,00323	0,00821
29	Сасафрас	7700	32,8	0,00426	0,0007	0,00496
30	Тополя канадська	9400	33,9	0,00361	0,00075	0,00436
31	Тополя бальзамічна	7600	27,7	0,00364	0,0005	0,00415
32	Ясен американський	12000	51,1	0,00426	0,00171	0,00597
33	Ясен голубий	9700	48,1	0,00496	0,00152	0,00647
34	Ясен чорний	11000	41	0,00373	0,0011	0,00483

Додаток А6

Визначення критичних деформацій стиску вздовж волокон деревини хвойних порід, які вирощені в Канаді та США

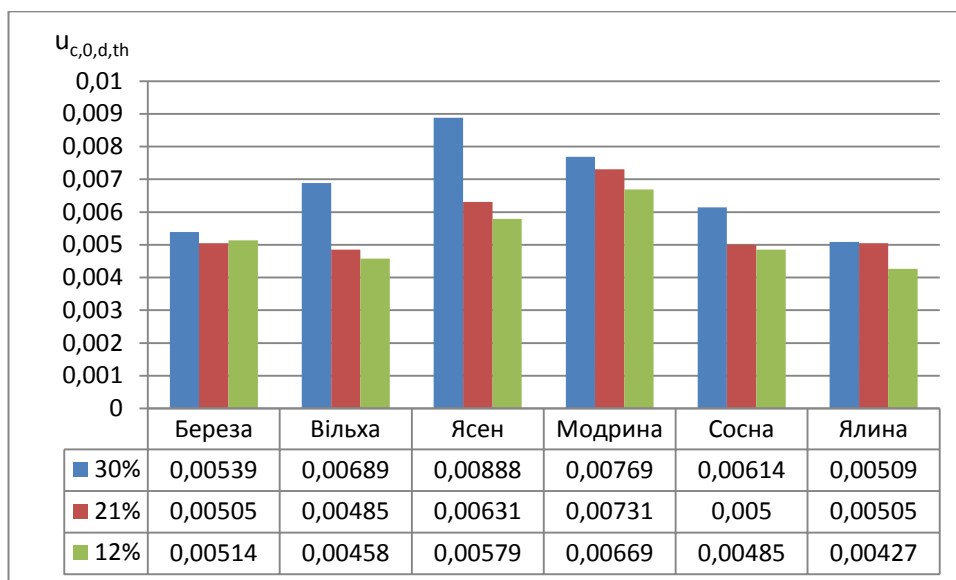
№	Порода деревини	E_0 , МПа	$f_{c,0,d}$, МПа	Пружні $u_{c,el}$	Пластичні $u_{c,pl}$	Сумарні $u_{c,0,d}$
1	Дугласія канадська	13600	50	0,00368	0,00164	0,00531
2	Дугласія західна	12500	51,3	0,0041	0,00172	0,00583
3	Ялина біла	10000	37	0,0037	0,0009	0,0046
4	Ялина червона	11000	38,5	0,0035	0,00097	0,00447
5	Ялина ситкінська	11200	37,8	0,00338	0,00094	0,00431
6	Ялина чорна	10500	41,6	0,00396	0,00113	0,0051
7	Кедр виргінський	6100	41,5	0,0068	0,00113	0,00793
8	Кедр	7200	35,9	0,00499	0,00084	0,00583
9	Кипарис болотяний	9900	43,9	0,00443	0,00126	0,0057
10	Модрина американська	11300	49,4	0,00437	0,0016	0,00597
11	Модрина західна	14300	61	0,00427	0,00244	0,0067
12	Ялиця бальзамічна	9600	34,3	0,00357	0,00077	0,00434

13	Ялиця благородна	11900	42,1	0,00354	0,00116	0,0047
14	Ялиця велика	10800	36,5	0,00338	0,00087	0,00425
15	Ялиця	10300	37,7	0,00366	0,00093	0,00459
16	Секвойя	9200	42,4	0,00461	0,00118	0,00579
17	Сосна Банкса	10200	40,5	0,00397	0,00107	0,00504
18	Сосна веймутова	9400	36	0,00383	0,00085	0,00468
19	Сосна жовта	9500	42,3	0,00445	0,00117	0,00562
20	Сосна жорстка	9900	41	0,00414	0,0011	0,00524
21	Сосна західна біла	10100	36,1	0,00357	0,00085	0,00443
22	Сосна червона	11200	41	0,00366	0,0011	0,00476
23	Сосна	12100	50,1	0,00414	0,00164	0,00578
24	Сосна пізня	12100	52	0,0043	0,00177	0,00607
25	Сосна скручена	10900	43,2	0,00396	0,00122	0,00519
26	Хемлок східний	9700	41,2	0,00425	0,00111	0,00536
27	Хемлок західний	11300	49	0,00434	0,00157	0,00591

Додаток Б

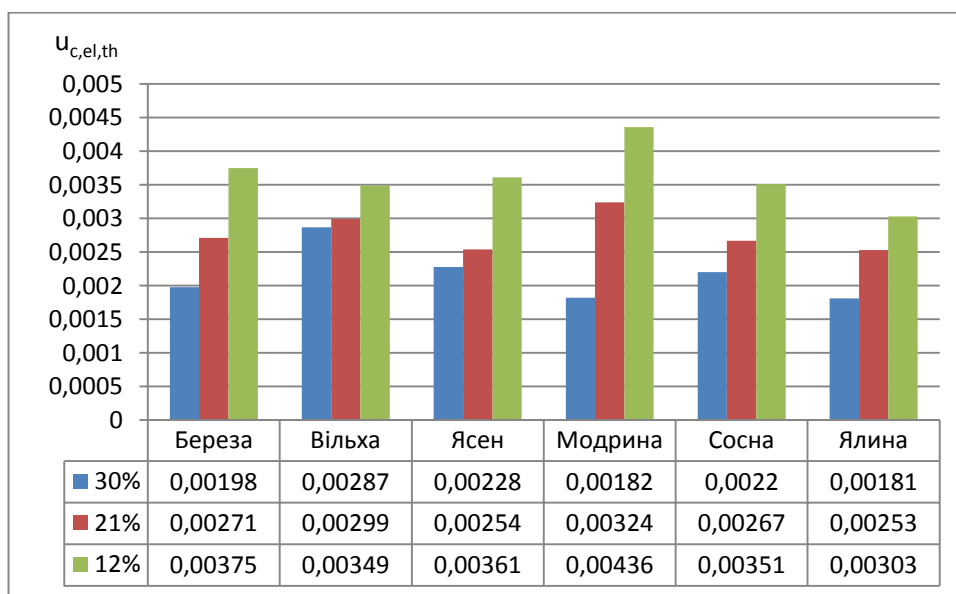
Додаток Б1

Динаміка зміни критичних деформацій листяних та хвойних порід деревини за різного показника вологості визначених за формулою (2.9)



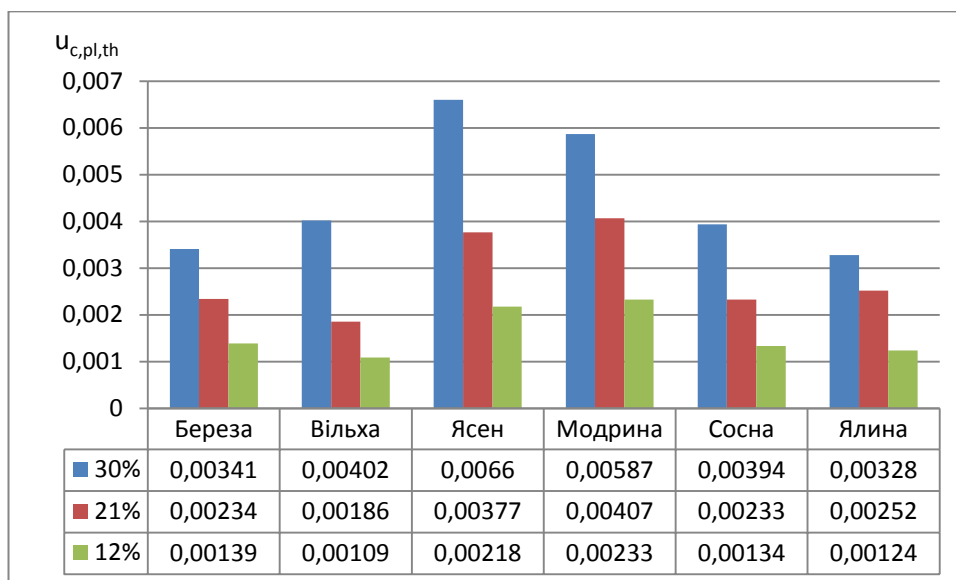
Додаток Б2

Динаміка зміни пружної складової критичних деформацій листяних та хвойних порід деревини за різного показника вологості визначених за формулою (2.9)



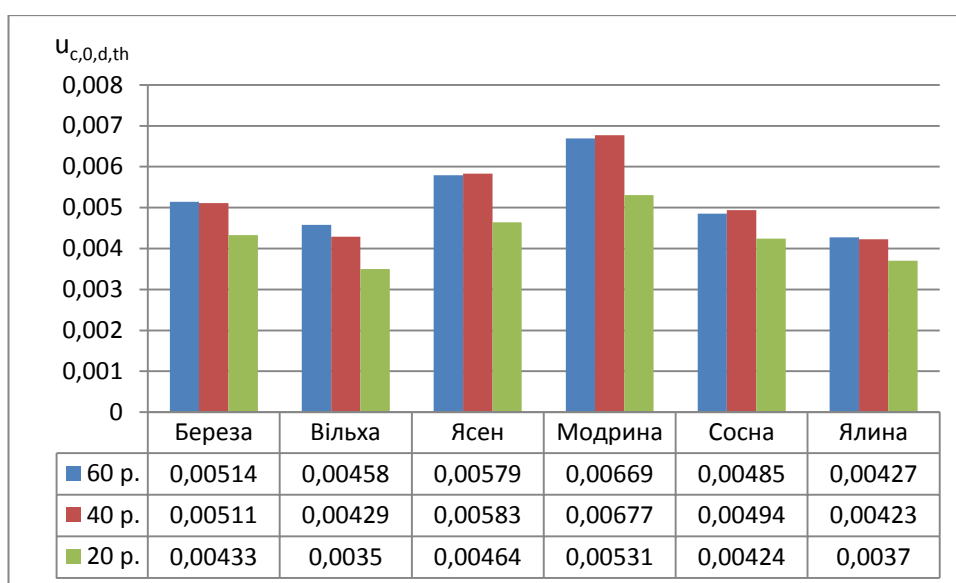
Додаток Б3

Динаміка зміни пластичної складової критичних деформацій листяних та хвойних порід деревини за різного показника вологості визначених за формулою (2.9)



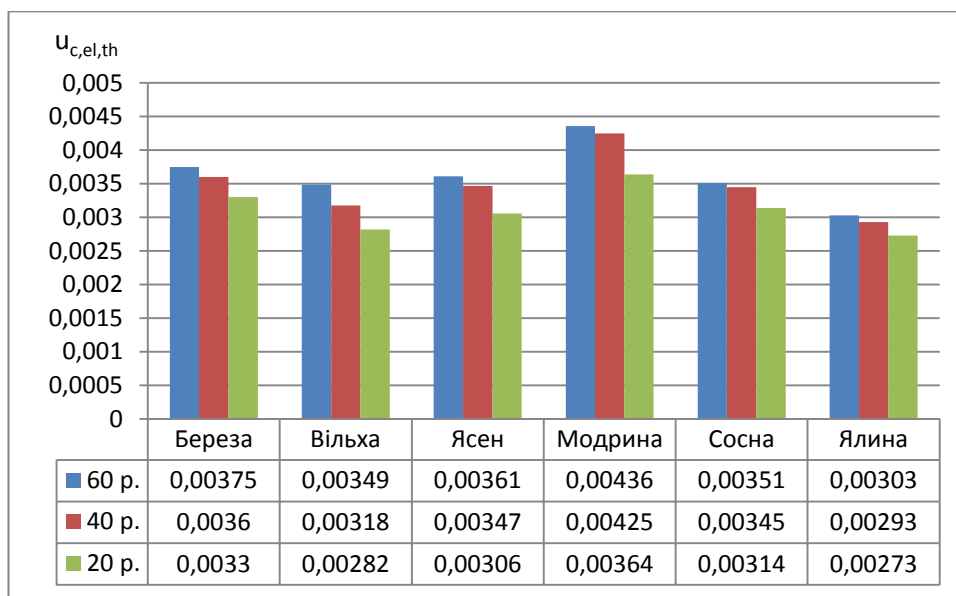
Додаток Б4

Динаміка зміни критичних деформацій листяних та хвойних порід деревини за різного показника віку визначених за формулою (2.9)



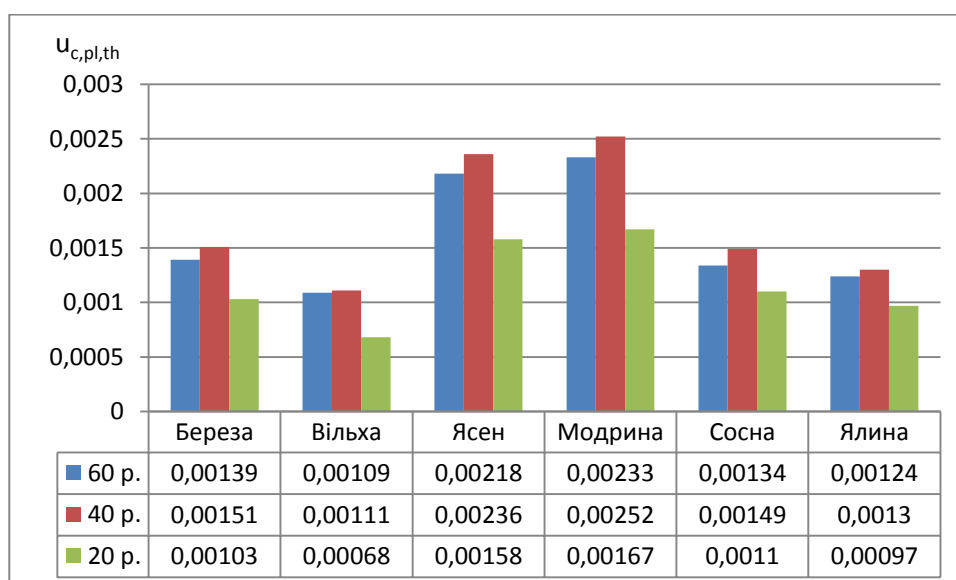
Додаток Б5

Динаміка зміни пружної складової критичних деформацій листяних та хвойних порід деревини за різного показника віку визначених за формулою (2.9)



Додаток Б6

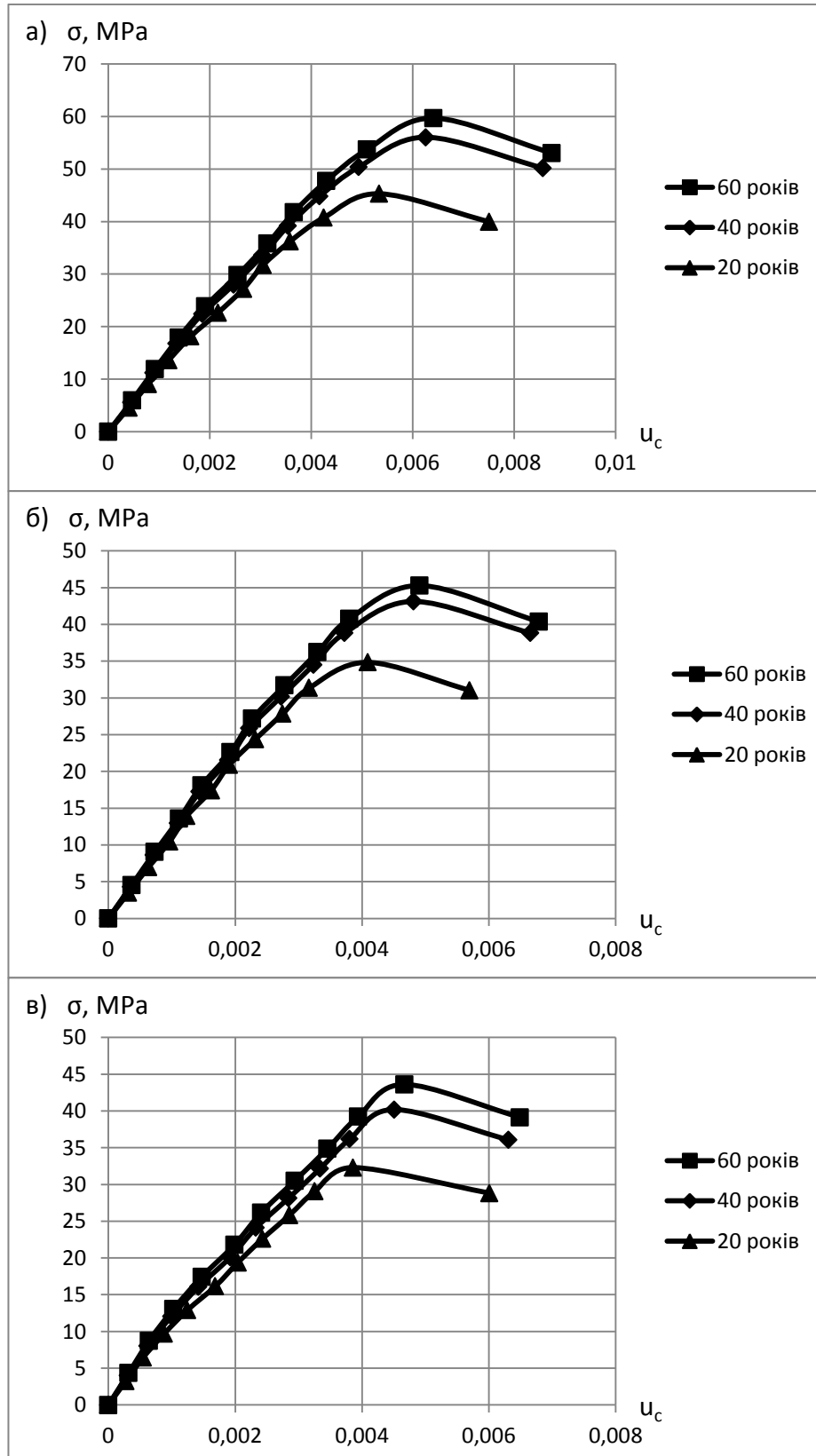
Динаміка зміни пластичної складової критичних деформацій листяних та хвойних порід деревини за різного показника віку визначених за формулою (2.9)



Додаток В

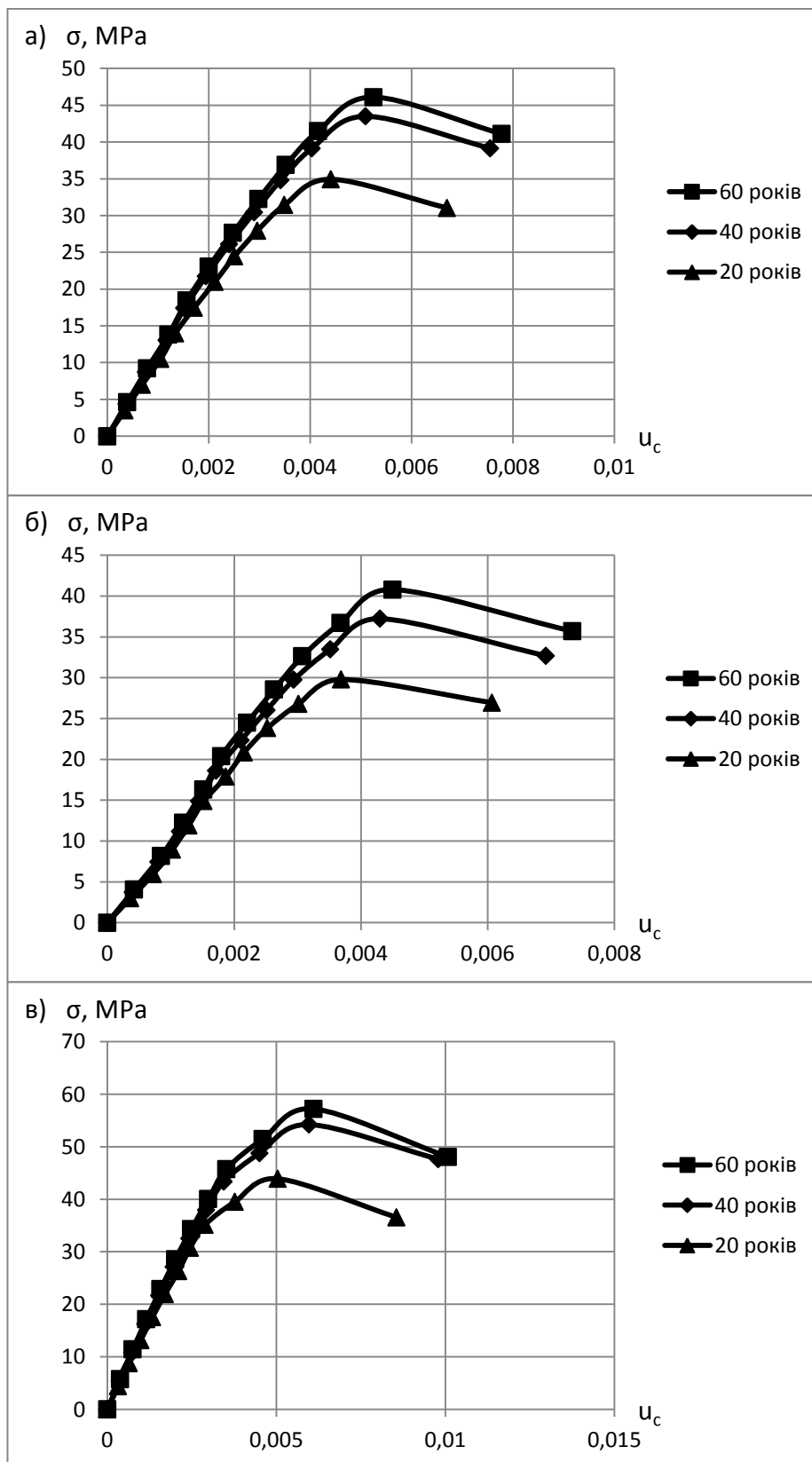
Додаток В1

Діаграми деформування « σ - u » деревини хвойних порід з обмеженням в точці граничних деформацій різного віку: а) модрина; б) сосна; в) ялина



Додаток В2

Діаграми деформування « σ - u » деревини листяних порід з обмеженням в точці граничних деформацій за різного віку: а) береза; б) вільха; в) ясен



Додаток Г

Додаток Г1

Значення максимальних напружень $f_{c,0,d}$ суцільної деревини вологістю в межах 12-30% визначених за рис. 3.23

Вологість W,%	Породи деревини					
	Листяні			Хвойні		
	Береза	Вільха	Ясен	Модрина	Сосна	Ялина
	$f_{c,0,d}$ МПа	$f_{c,0,d}$ МПа	$f_{c,0,d}$ МПа	$f_{c,0,d}$ МПа	$f_{c,0,d}$ МПа	$f_{c,0,d}$ МПа
30	19,8	21,5	31,0	24,8	21,3	19,4
29	20,9	21,8	31,4	25,9	22,1	20,4
28	21,1	22,0	31,8	26,7	22,7	21,1
27	22,3	22,2	32,1	28,1	23,4	22,0
26	23,4	22,9	32,9	29,8	24,1	24,1
25	24,1	23,7	33,8	31,9	25,3	25,9
24	25,7	23,9	34,1	33,9	26,0	26,7
23	27,2	24,7	35,0	36,2	27,1	28,1
22	28,1	25,8	36,1	37,7	28,3	29,8
21	29,5	26,3	37,4	38,9	29,4	30,6
20	31,3	27,7	39,7	40,9	31,3	31,9
19	33,2	29,2	41,2	43,7	33,6	33,4
18	34,8	30,3	43,3	45,9	34,2	35,2
17	35,3	32,1	46,6	48,2	37,1	36,7
16	38,4	34,0	47,9	50,1	38,2	37,9
15	40,2	35,2	50,2	54,2	40,0	39,8
14	42,3	37,9	53,7	55,8	42,1	41,1
13	45,2	38,2	55,6	58,9	43,9	42,2
12	46,1	40,8	57,2	59,7	45,3	43,6

Додаток Г2

Значення початкового модуля пружності E_0 суцільної деревини вологістю в межах 12-30% визначених за рис. 3.24

Вологість W, %	Породи деревини					
	Листяні			Хвойні		
	Береза	Вільха	Ясен	Модрина	Сосна	Ялина
	E_0 , МПа	E_0 , МПа	E_0 , МПа	E_0 , МПа	E_0 , МПа	E_0 , МПа
30	10000	7500	13600	10600	9700	10700
29	10100	7600	13700	10700	9800	10800
28	10200	7700	13800	10800	9900	10900
27	10300	7800	13900	11000	10000	11100
26	10400	7900	14000	11100	10200	11200
25	10500	8100	14200	11300	10400	11300
24	10600	8200	14300	11500	10500	11500
23	10700	8400	14500	11700	10700	11600
22	10800	8700	14600	11800	10800	11900
21	10900	8800	14700	12000	11000	12100
20	11000	9000	14800	12200	11300	12400
19	11200	9400	14900	12400	11500	12600
18	11300	9900	15000	12600	11700	12800
17	11500	10200	15100	12800	11900	13200
16	11700	10600	15300	13000	12100	13400
15	11900	11100	15600	13200	12500	13600
14	12000	11300	15700	13300	12600	13900
13	12200	11800	15800	13500	12800	14200
12	12300	12100	16000	13700	12900	14400

Додаток ГЗ

Значення середніх критичних деформацій $u_{c,0,d,сep}$ (між експериментальними та теоретичними за формулою (2.9) суцільноної деревини вологістю в межах 12-30% визначених за рис. 3.25

Вологість W, %	Породи деревини					
	Листяні			Хвойні		
	Береза	Вільха	Ясен	Модрина	Сосна	Ялина
	$u_{c,0,d,сep}$	$u_{c,0,d,сep}$	$u_{c,0,d,сep}$	$u_{c,0,d,сep}$	$u_{c,0,d,сep}$	$u_{c,0,d,сep}$
30	0,00583	0,00617	0,00798	0,00762	0,00598	0,00537
29	0,00581	0,00601	0,00780	0,00761	0,00591	0,00535
28	0,00579	0,0058	0,00764	0,00759	0,00584	0,00533
27	0,00578	0,00569	0,00756	0,00757	0,00577	0,0053
26	0,00571	0,00544	0,00744	0,00753	0,00568	0,00531
25	0,0056	0,00525	0,00728	0,00748	0,00553	0,00528
24	0,00559	0,00524	0,00699	0,00742	0,00538	0,00526
23	0,00558	0,00519	0,00681	0,00735	0,00531	0,00522
22	0,00555	0,00503	0,00669	0,00727	0,00527	0,0052
21	0,00549	0,00494	0,00651	0,00724	0,00524	0,00518
20	0,00547	0,00493	0,00638	0,00718	0,00522	0,00517
19	0,00543	0,00492	0,00619	0,00711	0,00519	0,00515
18	0,0054	0,00490	0,00599	0,00705	0,00517	0,00511
17	0,00539	0,00486	0,00586	0,00694	0,00514	0,00506
16	0,00535	0,00477	0,00578	0,00687	0,00509	0,00497
15	0,0053	0,00472	0,00559	0,00681	0,00507	0,00495
14	0,00528	0,00469	0,00557	0,00672	0,00501	0,0049
13	0,00522	0,00463	0,00551	0,00663	0,00497	0,00486
12	0,00519	0,00454	0,005495	0,00654	0,00488	0,00477

Додаток Г4

Значення пружної складової критичних деформацій $u_{c,el,th}$ за формулою (2.9)
суцільної деревини вологістю в межах 12-30%

Вологість W, %	Породи деревини					
	Листяні			Хвойні		
	Береза	Вільха	Ясен	Модрина	Сосна	Ялина
	$u_{c,el,th}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,el,th}$
30	0,00198	0,00287	0,00228	0,00182	0,0022	0,00181
29	0,002	0,00288	0,0023	0,00188	0,0028	0,00193
28	0,00202	0,00289	0,00232	0,00196	0,00230	0,00198
27	0,00205	0,0029	0,00234	0,00217	0,00233	0,00203
26	0,00209	0,00291	0,00236	0,00233	0,00242	0,00212
25	0,00215	0,00292	0,00238	0,00256	0,00244	0,00223
24	0,0024	0,00294	0,00241	0,00275	0,00247	0,00231
23	0,00255	0,00295	0,00245	0,00291	0,00252	0,00242
22	0,00265	0,00296	0,00248	0,00306	0,0026	0,00251
21	0,00271	0,00299	0,00254	0,00324	0,00267	0,00253
20	0,0028	0,00302	0,00261	0,00333	0,00272	0,00256
19	0,00299	0,00305	0,00271	0,00347	0,00278	0,00267
18	0,00309	0,00311	0,00284	0,00358	0,00289	0,00274
17	0,00319	0,00317	0,00296	0,0077	0,00301	0,00277
16	0,00332	0,00324	0,00311	0,00398	0,00311	0,00283
15	0,0039	0,0033	0,0033	0,00411	0,00315	0,0029
14	0,00347	0,00339	0,00341	0,00416	0,0033	0,00394
13	0,0036	0,00341	0,00353	0,00427	0,00338	0,00298
12	0,00375	0,00349	0,00361	0,00436	0,00351	0,00303

Додаток Г5

Значення пластичної складової критичних деформацій $u_{c,pl,th}$ за формулою (2.9) суцільної деревини вологістю в межах 12-30%

Вологість W, %	Породи деревини					
	Листяні			Хвойні		
	Береза	Вільха	Ясен	Модрина	Сосна	Ялина
	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,pl,th}$
30	0,00341	0,00402	0,0066	0,00587	0,00394	0,00328
29	0,0034	0,00389	0,00655	0,00578	0,00387	0,00324
28	0,00337	0,0037	0,00618	0,00563	0,00382	0,00321
27	0,00329	0,00347	0,00589	0,00546	0,00353	0,00319
26	0,00309	0,00309	0,00535	0,00523	0,00334	0,00314
25	0,00302	0,00269	0,00517	0,00485	0,00315	0,00296
24	0,00288	0,00238	0,00478	0,00476	0,00293	0,00283
23	0,00259	0,00219	0,00418	0,00443	0,00265	0,00274
22	0,00238	0,00202	0,00399	0,00425	0,00244	0,00265
21	0,00234	0,00186	0,00377	0,00407	0,00233	0,00252
20	0,00226	0,00173	0,00368	0,00392	0,00227	0,00243
19	0,00217	0,00165	0,00339	0,00373	0,00214	0,00235
18	0,00199	0,00159	0,00308	0,00354	0,00196	0,00214
17	0,0019	0,00147	0,00301	0,00332	0,00183	0,00196
16	0,00182	0,00136	0,00285	0,00313	0,00174	0,0018
15	0,0171	0,00127	0,00267	0,00292	0,00165	0,00169
14	0,0016	0,00119	0,00254	0,00273	0,00154	0,00154
13	0,00149	0,00112	0,00238	0,00265	0,00139	0,00135
12	0,00139	0,00109	0,00218	0,00233	0,00134	0,00124

Додаток Г6

Значення граничних деформацій $u_{c,u}$ суцільноної деревини вологістю в межах 12-30% визначених за рис. 3.26

Вологість W, %	Породи деревини					
	Листяні			Хвойні		
	Береза	Вільха	Ясен	Модрина	Сосна	Ялина
	$u_{c,u}$	$u_{c,u}$	$u_{c,u}$	$u_{c,u}$	$u_{c,u}$	$u_{c,u}$
30	0,00889	0,00825	0,01096	0,01057	0,0078	0,00771
29	0,00882	0,00822	0,01091	0,01055	0,00769	0,00769
28	0,00872	0,00812	0,0189	0,01053	0,00758	0,00759
27	0,00860	0,00805	0,01083	0,01051	0,00747	0,00747
26	0,00852	0,00803	0,01080	0,01049	0,00739	0,00735
25	0,00841	0,00797	0,01072	0,01048	0,00731	0,00719
24	0,00832	0,00792	0,01060	0,01046	0,00728	0,0071
23	0,00822	0,00782	0,01053	0,01038	0,00725	0,00702
22	0,00817	0,00769	0,01040	0,01028	0,00719	0,00699
21	0,00812	0,00762	0,01035	0,01008	0,00714	0,00689
20	0,00808	0,00759	0,01030	0,00994	0,00710	0,00687
19	0,00806	0,00758	0,01027	0,00974	0,00704	0,00684
18	0,00803	0,00756	0,01025	0,00964	0,0070	0,00682
17	0,00801	0,00755	0,10022	0,00954	0,00698	0,0068
16	0,00796	0,00754	0,01021	0,00934	0,00696	0,00677
15	0,00788	0,00749	0,01029	0,00914	0,00693	0,00672
14	0,00785	0,00744	0,01014	0,00884	0,00689	0,0067
13	0,00783	0,00739	0,01009	0,00879	0,00681	0,00668
12	0,00778	0,00734	0,01008	0,00874	0,00679	0,00649

Додаток Г7

Значення максимальних напружень $f_{c,0,d}$ суцільної деревини за віком визначених за рис. 4.15

Вік, років	Породи деревини					
	Листяні			Хвойні		
	Береза	Вільха	Ясен	Модрина	Сосна	Ялина
	$f_{c,0,d}$ МПа	$f_{c,0,d}$ МПа	$f_{c,0,d}$ МПа	$f_{c,0,d}$ МПа	$f_{c,0,d}$ МПа	$f_{c,0,d}$ МПа
60	46,1	40,8	57,2	59,7	45,3	43,6
55	45,9	40,1	56,9	59,1	44,9	43,3
50	45,6	39,5	56,4	58,3	44,5	42,4
45	44,7	38,4	55,7	57,6	43,8	42,1
40	43,5	37,2	54,2	56,1	43,1	40,2
35	41,9	35,8	52,4	53,8	41,7	38,4
30	39,8	34,1	49,6	51,9	39,4	36,2
25	38,1	31,7	44,7	48,2	37,7	34,1
20	34,9	29,8	43,9	45,3	34,8	32,3

Додаток Г8

Значення початкового модуля пружності E_0 суцільноної деревини за віком визначених за рис. 4.16

Вік, років	Породи деревини					
	Листяні			Хвойні		
	Береза	Вільха	Ясен	Модрина	Сосна	Ялина
	E_0 , МПа	E_0 , МПа	E_0 , МПа	E_0 , МПа	E_0 , МПа	E_0 , МПа
60	12300	12100	16000	13700	12900	14400
55	12300	12000	15900	13600	12800	14300
50	12200	11900	15800	13500	12700	14100
45	12100	11800	15700	13300	12600	13900
40	12100	11700	15600	13200	12500	13700
35	11900	11600	15300	13000	12300	13500
30	11400	10900	14900	12700	11900	13000
25	11000	10500	14400	12400	11600	12700
20	10500	10000	14000	12100	11400	12300

Додаток Г9

**Значення середніх критичних деформацій $u_{c,0,d,сep}$
(між експериментальними та теоретичними за формулою (2.9)
суцільної деревини за віком визначених за рис. 4.17**

Вік, років	Породи деревини					
	Листяні			Хвойні		
	Береза	Вільха	Ясен	Модрина	Сосна	Ялина
	$u_{c,0,d,сep}$	$u_{c,0,d,сep}$	$u_{c,0,d,сep}$	$u_{c,0,d,сep}$	$u_{c,0,d,сep}$	$u_{c,0,d,сep}$
60	0,00519	0,00454	0,00594	0,00654	0,00488	0,00447
55	0,00517	0,00449	0,00593	0,00653	0,004882	0,00445
50	0,00514	0,00445	0,00592	0,00653	0,004881	0,00442
45	0,00512	0,00437	0,00591	0,00652	0,00487	0,00439
40	0,0051	0,0043	0,0059	0,00651	0,00487	0,00437
35	0,00497	0,00352	0,0567	0,00636	0,00481	0,00423
30	0,00477	0,00383	0,00549	0,00605	0,00467	0,00407
25	0,0046	0,0036	0,00513	0,00574	0,00436	0,00387
20	0,00439	0,00338	0,00492	0,00542	0,00409	0,00369

Додаток Г10

Значення пружної складової критичних деформацій $u_{c,el,th}$ за формулою (2.9) суцільної деревини за віком

Вік, років	Породи деревини					
	Листяні			Хвойні		
	Береза	Вільха	Ясен	Модрина	Сосна	Ялина
	$u_{c,el,th}$ МПа	$u_{c,el,th}$ МПа	$u_{c,el,th}$ МПа	$u_{c,el,th}$ МПа	$u_{c,el,th}$ МПа	$u_{c,el,th}$ МПа
60	0,00375	0,00349	0,00361	0,00436	0,00351	0,00303
55	0,00371	0,00336	0,00359	0,00434	0,00350	0,0030
50	0,00367	0,00327	0,00356	0,00432	0,00349	0,00297
45	0,00363	0,00321	0,00352	0,00429	0,00348	0,00295
40	0,0036	0,00318	0,00347	0,00425	0,00345	0,00293
35	0,0058	0,00314	0,00344	0,00418	0,00339	0,00287
30	0,00554	0,00309	0,00338	0,00402	0,00328	0,00282
25	0,00346	0,00304	0,00321	0,00386	0,00315	0,00274
20	0,00332	0,00298	0,00314	0,00374	0,00305	0,00263

Додаток Г11

Значення пластичної складової критичних деформацій $u_{c,pl,th}$ за формулою (2.9) суцільної деревини за віком

Вік, років	Породи деревини					
	Листяні			Хвойні		
	Береза	Вільха	Ясен	Модрина	Сосна	Ялина
	$u_{c,pl,th}$ МПа	$u_{c,pl,th}$ МПа	$u_{c,pl,th}$ МПа	$u_{c,pl,th}$ МПа	$u_{c,pl,th}$ МПа	$u_{c,pl,th}$ МПа
60	0,00139	0,00109	0,00218	0,00233	0,00134	0,00124
55	0,00141	0,00110	0,00221	0,00241	0,00137	0,00125
50	0,00146	0,00112	0,00229	0,00248	0,00141	0,00127
45	0,00149	0,00113	0,00234	0,00251	0,00147	0,00129
40	0,00151	0,00111	0,00236	0,00252	0,00149	0,0013
35	0,00148	0,00103	0,00224	0,00238	0,00146	0,00125
30	0,00143	0,00096	0,00205	0,00217	0,00134	0,00113
25	0,00120	0,00081	0,00184	0,002	0,00122	0,00101
20	0,00105	0,00076	0,00166	0,00177	0,00105	0,00089

Додаток Г12

**Значення граничних деформацій $u_{c,u}$ суцільної деревини за віком
визначених за рис. 4.18**

Вік, років	Породи деревини					
	Листяні			Хвойні		
	Береза	Вільха	Ясен	Модрина	Сосна	Ялина
	$u_{c,u}$	$u_{c,u}$	$u_{c,u}$	$u_{c,u}$	$u_{c,u}$	$u_{c,u}$
60	0,00778	0,00734	0,01008	0,00874	0,00679	0,00649
55	0,00771	0,00729	0,01002	0,00876	0,00677	0,00647
50	0,00764	0,00721	0,00999	0,00878	0,00676	0,00645
45	0,00759	0,00713	0,00992	0,00879	0,00672	0,00641
40	0,00755	0,00692	0,00979	0,00877	0,00666	0,00639
35	0,00726	0,00647	0,00956	0,00846	0,00643	0,00631
30	0,00709	0,00594	0,00929	0,00824	0,00621	0,00622
25	0,00691	0,00519	0,00887	0,00783	0,0588	0,00617
20	0,0067	0,00457	0,00856	0,00751	0,0057	0,00601

Додаток Д

Список наукових публікацій за темою дисертації

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав та фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз

1. Yasniy P., Gomon S. Timber with improved strength and deformable properties. *Scientific Journal of Ternopil National Technical University*. Ternopil: TNTU, 2020. Vol 99. No3. P. 17–27. (Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, способи поверхневої та глибинної модифікацій суцільної деревини, опрацювання результатів, висновки). (Index Copernicus).
2. Гомон С.С. Математическая модель определения предельных деформаций лиственных и хвойных пород. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. Budapest, 2020. Ser. VIII(29), Issue: 238. Pp. 46–50. (Index Copernicus).
3. Gomon S., Gomon S., Karavan V., Gomon P., Sobczak-Piastka J. Investigation of solid and glued wood on the effect of variables of low-cycle repeated loads. *AIP Conference Proceedings 2077*, 020020 (2019). (Особистий внесок: виконано опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки). (Scopus, Web of Science).
4. Гомон С.С. Визначення критичних деформацій різних порід деревини вирощених на території України та за її межами. *Sciences of Europe*. Praha, 2020. No 54. Vol.1.Pp. 36–41.
5. Gomon S., Gomon S., Gomon P., Shkirenko S. The Basis of the Deformation Method for Calculating of Elements from Wood under Cross-Section Bending. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol.7 (4.8). P. 109–114. (Особистий внесок: запропоновано основні гіпотези розрахунку, висновки).
6. Yasniy P., Gomon S., Gomon P. On approximation of mechanical condition diagrams of coniferous and deciduous wood species on compression along the fibers. *Scientific Journal of Ternopil National Technical University*. Ternopil: TNTU, 2020.

Vol 97. No 1. P. 57–64. (*Особистий внесок: запропоновано теоретичні основи та апроксимацію діаграм механічного стану суцільної, клеєної та модифікованої деревини на основі полінома 4-го степеня*). (Index Copernicus).

7. Sobczak-Piastka J., Gomon S.S., Polishchuk M., Homon S., Gomon P., Karavan V. Deformability of Glued Laminated Beams with Combined Reinforcement. *Buildings* 2020, 10, 92. (*Особистий внесок: виконано опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки*). (Scopus, Web of Science).

8. Ясній П.В., Гомон С.С. Дослідження січних модулів листяних та хвойних порід деревини з різним показником вологості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця: ВНТУ, 2020. Вип. 4 (151). С. 125–130. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики з визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій (січного) суцільної деревини різної вологості з урахуванням пружно-пластичних властивостей матеріалу*). (Index Copernicus).

9. Гомон С.С., Гомон П.С., Гомон С.Ст. Універсальний метод визначення напружень в стиснутій зоні дерев'яних балок прямокутної форми на основі їх деформування. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. Budapest, 2020 Feb. VIII(27). Issue: 224. P. 10–12. (*Особистий внесок: виконано розроблення загальної методології розрахунку елементів та конструкцій на основі деревини з врахуванням дійсних (повних) та оптимізованих діаграм деформування матеріалу*). (Index Copernicus).

Публікації у наукових періодичних фахових виданнях України

10. Гомон С.С. Аналіз залежностей для побудови повних діаграм механічного стану деревини « σ - u ». *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2019. Вип. 37. С. 136–142.

11. Ясній П.В., Гомон С.С. Експериментальні дослідження суцільної деревини конструкційних розмірів з врахуванням фактора вологості. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Вінниця: ВНТУ, 2020. Том

28. №1. С. 41–48. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки*).

12. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Зінчук А.В. Дослідження модифікованої силором клеєної деревини на стиск вздовж волокон. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вісті Донецького гірничого інституту»*. Покровськ: ДВНЗ «Доненцький НТУ», 2017. №1. С. 134–138. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, способи поверхневої та глибинної модифікації клеєної деревини, опрацювання результатів, висновки*).

13. Gomon S.S., Savchuck V.O., Melnyk Yu.A., Vereshko O.V. Modern testing machines for investigation of wood and timber-based composite materials. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, 2020. Вип.14. С. 73–80. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень на сучасному випробувальному обладнанні; висновки*).

14. Гомон С.С., Гомон П.С. Побудова дійсних діаграм механічного стану деревини « σ - ϵ » суцільного перерізу ялини та берези за жорсткого режиму випробувань. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2020. Вип. 38. С. 321–330. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки*).

15. Гомон С.С. Методика експериментальних досліджень модифікованої силором деревини з стимуляцією просочення ультразвуком за роботи на стиск вздовж волокон. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2018. Вип. 36. С. 81–86.

16. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Діаграми механічного стану деревини сосни за одноразового короткочасного деформування до повної втрати міцності матеріалу. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2012. Вип 23. С. 166–171. (*Особистий внесок:*

виконано опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки).

17. Gomon S.S. Fluence of age factor on main strength and deformative properties of timber. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, 2020. Вип.13. С. 35–41.

18. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А., Яцук В.О. Визначення напружено-деформованого стану нормального перерізу за роботи деревини на поперечний згин з урахуванням повної діаграми деформування матеріалу. *Проблеми розвитку міського середовища*. Науково-технічний зб. Київ: НАУ, 2012. Вип.8. С. 66–72. *(Особистий внесок: запропоновано основні гіпотези розрахунку, висновки).*

19. Gomon S.S., Pilipaka L.M. Experimental studies of the glued wood strength and deformation properties under the hard test mode. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ, 2020. Том 31 (70). № 3. Ч.2. С. 130–135. *(Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки).*

20. Гомон С.Ст., Гомон С.С. Напружено-деформований стан нормальних перерізів за роботи деревини на поперечний згин з урахуванням повної діаграми деформування матеріалу. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2011. Вип. 22. С. 265–271. *(Особистий внесок: запропоновано основні гіпотези розрахунку, висновки).*

21. Гомон С.С., Савчук В.О., Мельник Ю.О., Верешко О.В. Область застосування та способи модифікації композиційних матеріалів на основі деревини. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк: ЛНТУ, 2019. Вип. 12. С. 44–50. *(Особистий внесок: виконано аналіз способів поверхневої та глибинної модифікацій суцільної та клеєної деревини, область застосування таких композиційних матеріалів, висновки).*

22. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Діаграми механічного стану деревини сосни за повторного деформування до повної втрати міцності

матеріалу. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2012. Вип 24. С. 106–112. (Особистий внесок: виконано опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки).

23. Гомон С., Гомон П., Караван В. Експериментальні дослідження хвойних та листяних порід деревини одноразовим короткочасним навантаженням на стиск уздовж волокон за жорсткого режиму випробувань. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура та сільськогосподарське будівництво*. Львів: ЛНАУ, 2020. №21. С. 34–40. (Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки).

24. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Прогнозування залишкового часу працездатності конструкцій з деревини за повторних навантажень. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2015. Вип. 31. С. 417–421. (Особистий внесок: запропоновано основні гіпотези розрахунку, висновки).

25. Gomon S.S., Pilipaka L.M. Universal method for determining the modules of deformation of solid wood and composite materials based on it. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки»*. Рівне: НУВГП, 2020. Випуск 2(90). С. 168–178. (Особистий внесок: виконано розроблення методики з визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій (січного) суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі з урахуванням пружно-пластичних властивостей матеріалу).

26. Гомон С.Ст., Гомон С.С. Особливості роботи будівельних конструкцій з деревини при дії повторних навантажень за критерієм деформаційного руйнування. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2014. Вип. 28. С. 152–157. (Особистий внесок: запропоновано основні гіпотези розрахунку, висновки).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

27. Гомон С.С. Перспективи використання модифікованої деревини в Україні для об'єктів сільського господарства. *Актуальні задачі сучасних технологій*: збірник тез доповідей VI міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, м. Тернопіль, 16–17 листопада 2017 р. Том 1. Тернопіль: ТНТУ, 2017. С. 72.

28. Gomon S., Gomon S., Polishchuk M. Experimental and statistical investigation of the secant modulus of elasticity of glued timber modified with polimer “Silor”. Proceedings of the 1st Eastern Europe Conference on Timber Constructions. Kharkiv – “Madrid” Typography, 2018. P. 137–142. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики з визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій (січного) суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі з врахуванням пружно-пластичних властивостей матеріалу*).

29. Гомон С.С. Методика досліджень основних механічних та деформативних властивостей суцільної та клеєної деревини. *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування*: матеріали міжнародної конференції, м. Тернопіль, 24–27 вересня. 2019 р. Тернопіль:ТНТУ, 2019. С. 198–200.

30. Гомон С.С., Дмитрук В.П., Мельник Ю. А., Верешко О.В. Аналіз поверхневих та глибинних способів модифікації деревини. *Сучасні проблеми містобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: збірник тез доповідей всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів, м. Луцьк, 15 листопада 2019 р. Луцьк: ЛНТУ, 2019. С.74–75. (*Особистий внесок: виконано аналіз способів поверхневої та глибинної модифікації суцільної та клеєної деревини, область застосування таких композиційних матеріалів, висновки*).

31. Гомон С.С., Савчук В.О. До визначення оптимального часу просочення полімерної композиції «СИЛОР» в тіло деревини. *Актуальні задачі сучасних технологій*: збірник тез доповідей VIII міжнародної науково-технічної

конференції молодих учених та студентів, м. Тернопіль, 27–28 листопада 2019 р. Том 1. Тернопіль: ТНТУ, 2019. С. 70. *(Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, способи поверхневої та глибинної модифікації суцільної та клеєної деревини, опрацювання результатів, висновки).*

32. Гомон С.С., Сальчук В.Л., Савчук В.О., Верешко О.В. Експериментальні дослідження деревини за жорсткого режиму випробувань за стандартної вологості. *Проблеми інтегрованого розвитку міст*: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції учених та студентів, м. Луцьк, 29–31 січня 2020 р. Луцьк: ЛНТУ, 2020. С. 18–20. *(Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки).*

33. Ясній П.В., Гомон С.С., Дмитрук В.П. Міцність та деформівність деревини модрина з різним показником вологості за жорсткого режиму випробувань. *SCIENCE, SOCIETY, EDUCATION: TOPICAL ISSUES AND DEVELOPMENT PROSPECTS*. Abstracts of VI International Scientific and Practical Conference, Kharkiv, 10–12 May 2020. P. 319–322. *(Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки).*

34. Гомон С.С., Гомон П.С. Теоретичні основи для побудови повних діаграм деформування деревини. Інновації у будівництві: збірник тез доповідей V міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів, м. Луцьк, 14 травня 2020 року. Луцьк: ЛНТУ, 2020. С. 5–7. *(Особистий внесок: запропоновано теоретичні основи та апроксимацію діаграм механічного стану суцільної, клеєної та модифікованої деревини на основі полінома 4-го степеня).*

35. Ясній П.В., Гомон С.С., Дмитрук В.П. Особливості побудови повних діаграм деформування деревини ясена за жорсткого режиму навантажень. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції до 60 річчя з дня заснування

Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175 річчя з дня народження Івана Пулюя, м. Тернопіль, 14–15 травня 2020 р. Тернопіль:ТНТУ, 2020. С. 51. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки*).

36. Гомон С.С., Сальчук В.Л., Верешко О.В. Прочностные и деформативные свойства увлажненной древесины. *Eurasian scientific congress. Abstracts of the 8th International scientific and practical conference*. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2020. Pp. 136–139. URL: <https://sci-conf.com.ua/viii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-eurasian-scientific-congress-9-11-avgusta-2020-goda-barselona-ispaniya-arhiv/>. (*Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень, опрацювання результатів, висновки*).

37. Гомон С.С., Савчук В.О., Мельник Ю. А., Верешко О.В. Апроксимація діаграм механічного стану деревини з підвищеним вмістом вологи. *Іноваційні процеси в галузі дорожнього будівництва: матеріали IV всеукраїнської науково-практичної інтернет- конференції молодих учених та студентів, м. Луцьк, 30 жовтня 2020 р.* Луцьк: ЛНТУ, 2020.

URL: <https://sites.google.com/lntu.edu.ua/konf2020ada/tezi>. (*Особистий внесок: запропоновано теоретичні основи та апроксимацію діаграм механічного стану суцільної деревини на основі полінома 4-го степеня*).

38. Гомон С.С. Дослідження критичних деформацій різних порід деревини експериментальним шляхом: збірник тез доповідей V міжнародної науково-технічної конференції «Ефективні технології в будівництві» та VII міжнародної науково-технічної конференції «Нові технології в будівництві», м. Київ, 19 листопада 2020 р. Київ: КНУБА, 2020. С. 138–139.

39. Гомон С.С., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Построение полной диаграммы деформирования древесины сосны при действии статической загрузки. Сборник научных трудов “*Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии*”. ГУ ВПО «Белорусско-Российский

університет». Могилев, 2012. Частина 2. С. 81–82. (Особистий внесок: виконано опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки).

В інших виданнях

40. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Зінчук А.В. Деформативність модифікованої силором клеєної деревини за роботи на стиск вздовж волокон. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2017. Вип. 34. С. 110–117. (Особистий внесок: виконано розроблення методики та проведення експериментальних досліджень модифікованої деревини, запропоновано способи поверхневої та глибинної модифікацій, опрацювання результатів, висновки).

41. Гомон С.С., Гомон П.С., Верешко О.В. До визначення критичних деформацій хвойних та листяних порід деревини. *Містобудування та територіальне планування*. Київ: КНУБА, 2020. Вип. 73. С.78–87. (Особистий внесок: запропоновано функцію з визначення критичних деформацій суцільної деревини хвойних і листяних порід і композиційних матеріалів на її основі).

42. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Гомон П.С., Верешко О.В. До визначення січного модуля деформацій клеєної деревини модифікованої «СИЛОРОМ». *Містобудування та територіальне планування*. Київ: КНУБА, 2020. Вип. 74. С. 92–101. (Особистий внесок: виконано розроблення методики з визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій (січного) суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі з урахуванням пружно-пластичних властивостей матеріалу).

43. Гомон С.Ст., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Дослідження міцності та деформативності деревини сосни за повторного деформування до досягнення повної втрати міцності матеріалу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк: ЛНТУ, 2014. Вип. 1. С. 40–46. (Особистий внесок: виконано опрацювання результатів, побудову діаграм деформування, висновки).

Додаток Е

Відомості про апробацію результатів дисертації

Основні положення дисертації викладені на наступних науково-технічних та науково-практичних конференціях: «Архітектура та екологія. Проблеми міського середовища» (м. Київ, 2011р.), «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (м. Рівне, 2012, 2014, 2018р.), «Матеріали, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, Беларусь, 19-20 апреля 2012г.), «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 16-17 листопада 2017р., 27-28 листопада 2019р.), «Proceedings of the 1st Eastern Europe Conference on Timber Constructions» (м. Харків, 7-8 червня 2018 р.), «Conference proceedings of the Scientific Session on Applied Mechanics X» (Bydgoszcz, Poland, 23 November 2018), «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (м. Тернопіль, 24-27 вересня 2019р.), «Сучасні проблеми містобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Луцьк, 15 листопада 2019р.), «Проблеми інтегрованого розвитку міст» (м. Луцьк, 29-31 січня 2020р.), «Actual problems of science and education» (Budapest, Hungary, 2 February, 2020), «SCIENCE, SOCIETY, EDUCATION: TOPICAL ISSUES AND DEVELOPMENT PROSPECTS» (м. Харків, 10-12 травня, 2020р.), «Інновації у будівництві» (м. Луцьк, 14 травня, 2020р.), «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» (м. Тернопіль, 14-15 листопада, 2020р.), «SURVEYING, CIVIL ENGINEERING, GEOINFORMATION IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT» (Bydgoszcz, Poland, June 2-10, 2020), «Eurasian scientific congress. Abstracts of the 8th International scientific and practical conference» (Barcelona, Spain, August 9-11, 2020), «Іноваційні процеси в галузі дорожнього будівництва» (м. Луцьк, 30 жовтня, 2020р.), «Ефективні технології в будівництві» (м. Київ, 19-20 листопада, 2020р.), «Нові технології в будівництві» (м. Київ, 19-20 листопада, 2020р.).

Додаток Є ВПРОВАДЖЕННЯ



Товариство з обмеженою
відповідальністю
«Інжинірингова компанія «Тертал»
33014, м.Рівне, вул.Степана Бандери, 41,
тел. (050) 746 94 01, (068) 626 94 94,
e-mail: ik.tertal@gmail.com,
caim: www.tertal.com.ua

«15» січня 2020р № 2.3

Довідка про впровадження

Результати дисертаційної роботи Гомона Святослава Святославовича на тему: «Поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі» використані:

- при проектуванні капітального ремонту будівлі 1/41 (хірургічне відділення), військового містечка № 1, м. Рівне – ремонт покриття - крокв'яної системи, зокрема була розрахована крокв'яна система за запропонованою методикою автора з врахуванням повних діаграм деформування матеріалу та запроєктовано її підсилення за допомогою поверхневої модифікації полімерною композицією «силор».

- при проектуванні поточного ремонту будівлі інв.№1/359 (спортзал) військового містечка №1 в/ч А0796 за адресою: Рівненська обл., м. Рівне, вул. Дубенська, 2 (ремонт підлоги, заміна вікон та вхідних дверей), зокрема були застосовані поверхнева та глибинна модифікація дерев'яної підлоги та вхідних дверей полімерною композицією «силор»

Директор

Головний інженер



Вихованець В.В.

Козюра Д.О.



Довідка про впровадження

Результати дисертаційної роботи Гомона Святослава Святославовича на тему: «Поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі» були застосовані ПП «Колі» при поверхневій та глибинній модифікації полімерною композицією «силор» при виготовленні підлоги, дверей, вікон та інших будівельних конструкцій на основі суцільної та клеєної деревини.

Директор приватного підприємства



Кратюк М.К.

10.09.2020р.

ТОВ «ОДЕК» УКРАЇНА

вул.Заводська, 9, смт. Оржів,
Рівненська обл, Україна, 35313
тел. +38 0362 693 608
факс +38 0362 693 610
odek@odekdns.utel.net.ua



«13» жовтня 2020р № 51

Довідка про впровадження.

Результати дисертаційної роботи Гомона Святослава Святославовича на тему: «Поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі» використані Товариством з обмеженою відповідальністю «ОДЕК» Україна при виробництві продукції будівельних матеріалів та виробів на основі деревини, зокрема застосована поверхнева та глибинна модифікація полімерною композицією «силор».

Головний технолог



Кабалюк І.Б.

Україна МФО 322313 філія ПАТ «Укресімбанк» м. Рівне
п/р 26002000014778



ЗАТВЕРДЖУЮ”
Перший проректор ТНТУ
Митник М.М.
_____ 2020 р.

Акт впровадження

1. *Об'єкт впровадження:* результати дисертаційної роботи.
2. *Ким запропоновано, виконавці, адреса:* Гомон С.С. докторант кафедри інжинірингу машинобудівних технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська 56.
3. *Джерело інформації:* Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня Гомона С.С. на тему: «Поліпшення міцнісних та деформівних властивостей суцільної деревини та композиційних матеріалів на її основі».
4. *Де впроваджено:* Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська 56, кафедра будівельної механіки.
5. *Термін впровадження:* 2020 р.
6. *Висновок по впровадженню:* Результати дисертаційної роботи використані для вдосконалення навчальних курсів за спеціальністю 192 "Будівництво та цивільна інженерія" з предметів "Конструкції з деревини та пластмас" для бакалаврів та "Механіка руйнування будівельних конструкцій" для магістрів. Результати дозволяють оновити інформацію щодо розрахунку елементів та конструкцій на основі суцільної, клеєної та модифікованої деревини у будівельній галузі на основі повних діаграм деформування матеріалу.

Проректор з
наукової роботи

Марущак П.О.

Завідувач кафедри
будівельної механіки

Ясній В.П.