

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
КРИТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ДЕРЕВИНИ ХВОЙНИХ ПОРІД З
ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ ВОЛОГИ**

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF THE CRITICAL
DEFORMATIONS OF CONIFER WOOD WITH INCREASED MOISTURE
CONTENT**

Гомон Св. Св., д.т.н., проф., ORCID.ORG /0000-0001-9818-1804, **Гомон С. С., д.т.н., проф.,** ORCID.ORG /0000-0003-2080-5650, **Рошчук М.М., аспірант,** ORCID.ORG /0000-0002-0415-8273 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне),

Homon S.S., doctor of technical sciences, professor, Gomon S.S., doctor of technical sciences, professor, Roshchuk M.M., postgraduate (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

Розроблено методику та проведено експериментальні дослідження зразків деревини хвойних порід осьовим стиском вздовж волокон за короткочасного навантаження з вологістю понад 30%. Побудовано діаграми деформування деревини та визначено експериментальним шляхом усереднені критичні деформації за відповідних показників середньої граничної міцності. Запропоновано методику визначення критичних деформацій деревини хвойних порід з вологістю понад 30% та визначено критичні деформації деревини модрина, сосни, ялини та окремо визначено пружну та пластичну складові. Наведено збіжність теоретичних та експериментальних значень критичних деформацій.

Wood is a strong elastic-plastic material with special physical and mechanical properties. Products and elements based on wood can be used in various aggressive environments, including those with high moisture content. Humanity began to use wood thousands of years ago for various purposes. Nowadays, we cannot imagine many branches of the economy without the use of wood. This material pleases our eyes at every step: at home, at work, on the street, in public places.

In recent years, modern testing machines have appeared that allow testing various materials from the beginning of loading to the complete loss of material strength. That is, it is possible to analyze the work of materials in the pre-critical and supercritical stages of deformation, including wood.

The purpose of this work is to carry out experimental and theoretical studies of coniferous wood samples of structural dimensions by axial compression along

the fibers with an increased moisture content (more than 30%) and to establish the values of critical deformations.

The methodology was developed and experimental studies of softwood wood samples were carried out by axial compression along the fibers under short-term load with humidity over 30%. Diagrams of wood deformation were constructed and averaged critical deformations were determined experimentally for the corresponding indicators of average ultimate strength. A technique for determining critical deformations of coniferous wood with a moisture content of more than 30% is proposed. A formula for determining such wood parameters is proposed. This formula consists of elastic and plastic components. The critical deformations of larch, pine, and spruce wood were theoretically determined, and the elastic and plastic components were determined separately. Convergence of theoretical and experimental values of critical deformations is given.

Ключові слова:

Деревина, осьовий стиск, критичні деформації, діаграми деформування, гранична міцність.

Wood, axial compression, critical deformations, deformation diagrams, ultimate strength.

Вступ. Деревина – це міцний пружно-пластичний матеріал з особливими фізико-механічними властивостями. Людство деревину почало використовувати тисячі років назад з різним призначенням. В наш час ми не уявляємо багато галузей економіки без використання деревини. Даний матеріал радує наше око на кожному кроці: в побуті, на роботі, на вулиці, в громадських місцях.

Вироби та елементи на основі деревини можуть експлуатуватися в різних агресивних середовищах, в тому числі і з підвищеним вмістом вологи. В даній статті ми спробуємо проаналізувати зміну механічних властивостей деревини хвойних порід за вологості 30%, а саме критичних деформацій за осьового тиску вздовж волокон.

Аналіз літературних досліджень. В останні роки з'явилися сучасні випробувальні машини, які дозволяють випробовувати різні матеріали від початку завантаження і до повної втрати міцності матеріалу [1]. Тобто можливо аналізувати роботу матеріалів в докритичній та закритичній стадії деформування, в тому числі і деревини. Експериментальні дослідження деревини різних порід за жорсткого режиму випробувань на стиск вздовж волокон були проведені різними дослідниками та побудовані повні діаграми деформування [2-6]. Нами також були проведені такі дослідження для деревини листяних та хвойних порід з врахування фактору вологості, віку та швидкості деформування [7-9, 13, 14].

В роботах [2-6] експериментальним шляхом встановлено значення критичних деформацій різних порід деревини. Нами також було встановлено показники критичних деформацій як експериментальним шляхом [7-9, 13, 14], так і теоретичним за стандартної вологості [13, 15-17].

Експериментальними та теоретичними дослідженнями деревини різної вологості та різним типом навантаження займалося ряд закордонних вчених [10-12]. Нами були проведені експериментальні дослідження зразків конструкційних розмірів за осьового стиску вздовж волокон з різним показником вологості та встановлено ряд основних механічних властивостей.

Мета даної роботи – це проведення експериментально-теоретичних досліджень деревини хвойних порід зразків конструкційних розмірів осьовим стиском вздовж волокон з підвищеним вмістом води (більше 30%) та встановлення значень критичних деформацій.

Методика експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження виконано з використанням таких порід деревини, як модрина, сосна, ялина. Розмір призм-близнюків, виготовлених в заводських умовах, становив 30x30x120 мм. Зразки отримано шляхом вирізування з брусів. Вологість деревини на момент випробувань була вища 30%. Вологість контролювалася вологоміром MD-814. Для проведення експерименту обрано партію з 12 зразків для кожної із вказаних порід деревини, вік яких становив орієнтовно 60 років.

Випробування призм проводилося в пресі осьовим стиском уздовж волокон за короткочасного навантаження за жорсткого режиму випробувань (за приростом переміщень плити пресу) у відповідності з чинними нормативними документами.

Викладення основного матеріалу. Критичні деформації суцільної деревини $u_{c,0,d}$ – це деформації, які відповідають максимальному напруженню зразка $f_{c,0,d}$. Вони знаходяться на вершині діаграми «напруження-деформації» (Рис. 1).

Суцільна деревина працює як пружно-пластичний матеріал, тому для знаходження критичних деформацій виділяємо дві складові [15-17]

$$u_{c,0,d} = u_{c,el} + u_{c,pl}, \quad (1)$$

де $u_{c,el}$ – пружна деформація суцільної деревини;

$u_{c,pl}$ – пластична деформація суцільної деревини.

Враховуючи наші експериментальні дослідження [7-9, 13, 14] формула (1) набуде вигляду

$$u_{c,0,d} = f_{c,0,d} / E_0 + c_1 \cdot 10^{-7} \cdot f_{c,0,d}^2, \quad (2)$$

де E_0 – початковий модуль пружності суцільної деревини;

c_1 – коефіцієнт, що залежить від вологості і віку суцільної деревини.

За вологості більше 30% та віку деревини в межах 50...100 років коефіцієнт $c_1 = 8,7 \cdot 10^{-7}$ (МПа)² для будь-якої хвойної породи деревини [13].

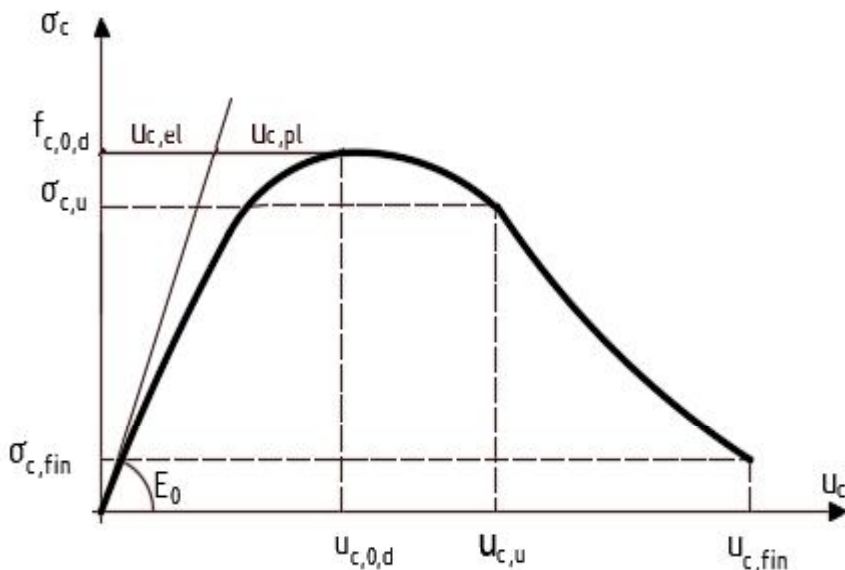


Рис.1. Повна діаграма деформування «напруження-деформації» деревини та композиційних матеріалів на її основі осьовим стиском вздовж волокон [13]

Після проведення експерименту та обробки результатів були побудовані усереднені діаграми деформування деревини « σ - u » хвойних (модрина, сосни, ялини) порід деревини від початку завантаження і до точки граничних деформацій за вологості більше 30% (рис.2). На даних діаграмах є дві ділянки: висхідна та спадна. Це свідчить про те, що деревина працює не тільки до точки максимального напруження, а і має певну залишкову (закритичну) міцність після проходження цієї точки.

Провівши аналіз отриманих діаграм, було встановлено середні критичні деформації за відповідних показників середньої граничної міцності всіх досліджуваних порід деревини. За формулою (2) було визначено критичні деформації теоретичним шляхом. Також за цією ж формулою окремо знаходимо пружну та пластичну складові. Отримані результати заносимо до табл.1.

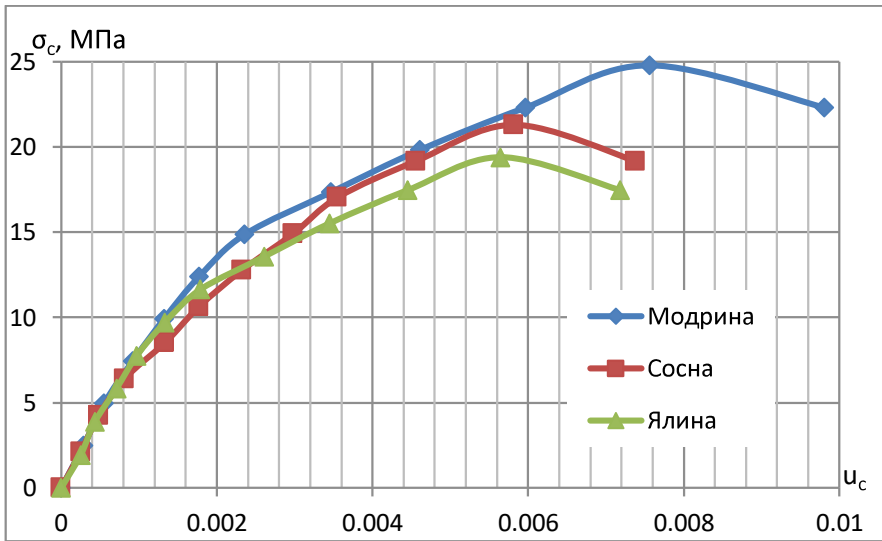


Рис.2. Діаграми « σ_c - u_c » суцільної деревини хвойних порід з обмеженням в точці граничних деформацій за вологості більше 30%

Таблиця 1

Значення середніх критичних деформацій деревини хвойних порід визначені експериментальним шляхом та за формулою (2)

№п/п	Порода деревини	К-сть призм шт.	$f_{c,0,d}$ МПа	E_0 , МПа	$u_{c,0,d,exp}$	$u_{c,el,th}$	$u_{c,pl,th}$	$u_{c,0,d,th}$
1	Модрина	6	24,8	10600	0,00756	0,00182	0,00587	0,00769
2	Сосна	6	21,3	9700	0,00582	0,00220	0,00394	0,00614
3	Ялина	6	19,4	10700	0,00565	0,00181	0,00328	0,00509

Проведемо аналіз отриманих експериментальних та теоретичних результатів досліджень за всіма зразками хвойних порід суцільної деревини вологістю більше 30% (рис.3), (табл.2) методами математичної статистики.

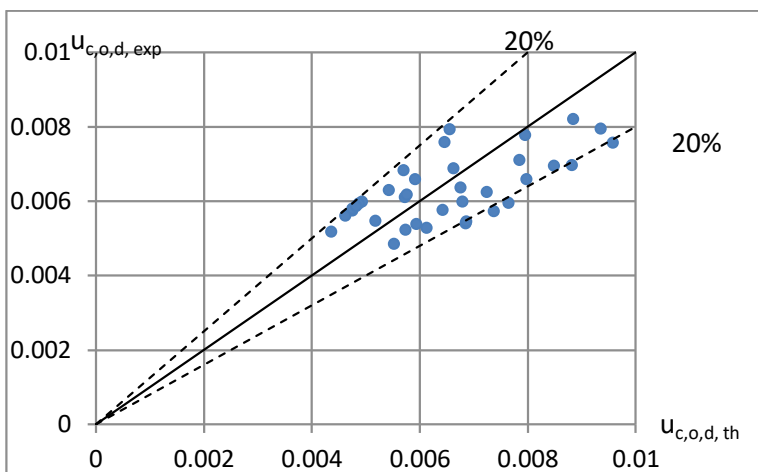


Рис.3. Відхилення теоретичних значень критичних деформацій від експериментальних значень критичних деформацій за формулою (2) від експериментальних значень критичних деформацій для хвойних порід вологістю більше 30%

Таблиця 2

Статистична оцінка формули (2) з визначення критичних деформацій суцільної хвойної деревини вологістю понад 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 та дані приведені в табл.2 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) є те, що коефіцієнт c_1 за вологості 30% є однаковим за значенням для всіх порід деревини.

Висновки.

1. Розроблено методику та проведено експериментальні дослідження зразків деревини хвойних порід осьовим стиском вздовж волокон за короткочасного навантаження з вологістю понад 30%.

2. Побудовано діаграми деформування деревини та визначено експериментальним шляхом усереднені критичні деформації за відповідних показників середньої граничної міцності.

3. Запропоновано методику визначення критичних деформацій деревини хвойних порід з вологістю понад 30% та визначено за формулою (2) критичні деформації деревини модрина, сосни, ялини та окремо визначено пружну та пластичну складові.

4. Наведено збіжність теоретичних та експериментальних значень критичних деформацій.

1. Гомон Св.Св., Довбенко Т.О., Матвіюк О.В., Верешко О.В., Кулаковський Л.Я., Чорномаз Н.Ю. Аналіз випробувального обладнання для дослідження матеріалів за жорсткого режиму прикладання навантаження. *Містобудування та територіальне планування*. Київ: КНУБА, 2021. Вип. 78. С. 166-172.

Homon Sv.Sv., Dovbenko T.O., Matviyuk O.V., Vereshko O.V., Kulakovs'kyi L.YA., Chornomaz N.YU. Analiz vyprobuval'noho obladdnannya dlya doslidzhennya materialiv za zhorstkoho rezhymu prykladannya navantazhennya. *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya*. Kyiv: KNUBA, 2021. Vyp. 78. S. 166-172.

2. Todorovic M., Koetsier M., Simovic N., Glisovic I., Pavlovic M. (2023). Determination of mode I fracture properties of European spruce. *Wood research* 68(2), pp. 334-347.

3. Da Silva A., Kyriakides S. (2007). Compressive response and failure of balsa wood. *International Journal of Solids and Structures*, Volume 44. Issues 25–26. Pp. 8685–8717.

4. Tariq K.A., Haroon M., Mughal A.H., Ali S. (2022). Physical and mechanical characterization of structural wood used in Pakistan. *Wood research* 67(1), pp. 134-146.

5. 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). Pp. 131–146.

6. Hu W., Chen B., Zhang T. (2021). Experimental and numerical studies on mechanical behaviors of beech wood under compressive and tensile states. *Wood research* 66 (1), pp. 27-38.

7. Гомон С.С., Гомон П.С. Побудова дійсних діаграм механічного стану деревини «б-и» суцільного перерізу ялини та берези за жорсткого режиму випробувань. *Ресурсоekonomні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2020. Вип. 38. С. 321–330.

Homon S.S., Homon P.S. Pobudova diyсных diahram mekhanichnoho stanu derevyny «s-u» sutsil'noho pererizu yalyny ta berezy za zhorstkoho rezhymu vyprobuvan'. *Resursoekonomni materialy, konstruksiyi, budivli ta sporudy*. Rivne: NUVHP, 2020. Vyp. 38. S. 321–330.

8. 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.

Homon S., Gomon P., Karavan V. Eksperymental'ni doslidzhennya khvoynykh ta lystyanykh porid derevyny odnorazovym korotkochasnym navantazhennyam na stysk vzdovzh volokon za zhorstkoho rezhymu viprobuvan'. Visnyk L'vivs'koho natsional'noho ahrarynoho universytetu. Arkhitektura ta sil's'kohospodars'ke budivnytstvo. L'viv: LNAU, 2020. №21. S. 34–40.

9. Гомон Св.Св., Матвіюк О.В., Кулаковський Л.Я., Чорномаз Н.Ю. До побудови повних діаграм деформування деревини вільхи та ялини за стандартної вологості. *Містобудування та територіальне планування*. Київ: КНУБА, 2022. Вип. 79. С. 87–92.

Homon Sv.Sv., Matviyuk O.V., Kulakovs'kyu L.YA., Chornomaz N.YU. Do pobudovy povnykh diahram deformuvannya derevyny vil'khy ta yalyny za standartnoyi volohosti. Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya. Kyiv: KNUBA, 2022. Vyp. 79. S. 87–92.

10. Thygesen, L.G., Tang Engelund, E., Hofmeyer, P. (2010). Water sorption in wood and modified wood at high values of relative humidity. Part I: Results for untreated, acetylated, and furfurylated Norway spruce. *Holzforsch.* 64, 315-323.

11. Vasic, S., Stanzl-Tschegg, S. (2007). Experimental and numerical investigation of wood fracture mechanisms at different humidity levels. *Holzforschung*, 61, 367-374.

12. Huang, S.-H., Cortes, P., Cantwell, W.J. (2006). The influence of moisture on the mechanical properties of wood polymer composites. *Journal of Material Science*, 41, 5386-5390.

13. Гомон Св.Св., Ясній П.В., Гомон П.С., Ясній В.П. Класична модель дійсної роботи суцільної та модифікованої деревини осьовим стиском вздовж волокон: монографія. Рівне: Волинські береги, 2023. 316 с.

Homon S.S., Yasniy P.V., Homon P.S., Yasniy V.P. Klyasychna model' diysnoyi roboty sutsil'noyi ta modyfikovanoi derevyny os'ovym styskom vzdovzh volokon: monohrafiya. Rivne: Volyns'ki oberehy, 2023. 316 s.

14. 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.

Yasniy P.V., Homon S.S. Eksperymental'ni doslidzhennya sutsil'noyi derevyny konstruktsiynykh rozmiriv z vrakhuvannyam faktora volohosti. Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. Vinnytsya: VNTU, 2020. Tom 28. №1. S. 41–48.

15. 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.

Homon S.S., Homon P.S., Vereshko O.V. Do vyznachennya krytychnykh deformatsiyi khvoynykh ta lystyanykh porid derevyny. Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya. Kyiv: KNUBA, 2020. Vyp. 73. S.78–87.

16. Гомон Св.Св., Гомон Св.Ст. До визначення деяких деформативних закритичних характеристик деревини. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди*. Рівне, 2022. Вип. 41. С. 119-125.

Homon Sv.Sv., Homon Sv.St. Do vyznachennya deyakykh deformatyvnykh zakrytychnykh kharakterystyk derevyny. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli i sporudy. Rivne, 2022. Vyp. 41. S. 119-125.

17. 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.

ДЕФОРМУВАННЯ ДЕРЕВИНИ ЗА РОБОТИ НА ОСЬОВИЙ СТИСК, ПРЯМИЙ ТА КОСИЙ ПОПЕРЕЧНИЙ ЗГИН

DEFORMATION OF WOOD DURING AXIAL COMPRESSION, DIRECT AND OBLIQUE TRANSVERSE BENDING

Гомон С. С., д.т.н., проф., ORCID.ORG /0000-0003-2080-5650, Гомон Св. Св., д.т.н., проф., ORCID.ORG /0000-0001-9818-1804 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне),

Gomon S.S., doctor of technical sciences, professor, Homon S.S., doctor of technical sciences, professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

В лабораторії НУВГП проведено комплексні експериментально-теоретичні дослідження роботи елементів з цільної та клеєної деревини за осьового стиску, прямого та косоного поперечного згину. На основі експериментальних досліджень встановлено січний модуль деформацій деревини при осьовому стиску та поперечному згині. Побудовано діаграми деформування різних шарів деревини балок з цільної та клеєної деревини в зоні чистого згину по висоті поперечного перерізу за роботи на прямий та косий згин за дії одноразових та повторних навантажень. Експериментально визначено положення нейтральної лінії в зоні прямого чистого згину. Встановлено, що починаючи з початку прикладання одноразового короткочасного статичного навантаження нейтральна площина в балках з цільної та клеєної деревини змінює своє положення в сторону зменшення висоти розтягнутої зони.

In the laboratory of the National University of Water Management and Nature Management, complex experimental and theoretical studies of the operation of elements made of solid and glued wood under axial compression, direct and oblique transverse bending were carried out. The obtained results of experimental studies made it possible to establish the shear modulus of wood deformations under axial compression and transverse bending. The shear modulus of deformations with increasing loads decreases due to the growth of elastic and plastic deformations of wood, and at any two experimental points, a graph of dependence can be reliably plotted and the initial modulus of elasticity of wood can be established.

The layer-by-layer relative deformations of the wood in the beams were established, which were determined in the zone of pure bending at different distances from the neutral plane at different levels of load. Also, the processing