



I. M. Сопушинський¹, Х. Мілітц², Р. Т. Максимчук¹, В. Біцікс²

¹ Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

² Геттінгенський університет ім. Георга Августа, м. Геттінген, Німеччина

ДИНАМІЧНИЙ МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ ХВИЛЯСТО-ЗАВИЛЬКУВАТОЇ ДЕРЕВИНИ *ABIES ALBA* MILL.

Досліджено відмінності динамічного модуля пружності, коефіцієнта згасання та швидкості звуку хвилясто-завилькуватої деревини порівняно з прямоволокнутою деревиною ялиці білої. Графічно наведено варіацію досліджуваних показників у межах радіуса та висоти стовбура. У межах радіуса стовбура із хвилясто-завилькуватою структурою можна виділити два класи якості деревини, а саме: перший – периферійна деревина (40 % радіуса стовбура) та другий – центральна (ядрова) деревини. Структурне розміщення деревного волокна, зокрема хвилясто-завилькувате, істотно визначає фізико-механічні характеристики деревини та їх варіацію. Коефіцієнт згасання деревини змінюється: від 6 до 10 для хвилясто-завилькуватої деревини; від 12 до 14 для прямоволокнутої деревини. Встановлено пряmlinійну залежність першого порядку між динамічним модулем пружності та об'ємною масою деревини. Збільшення об'ємної маси прямоволокнутої деревини зумовлює збільшення модуля пружності та описується рівнянням прямої ($R^2=0,69\dots0,72$). Пряmlinійна залежність між динамічним модулем пружності та щільністю хвилясто-завилькуватої деревини є інверсійною. Динамічний модуль пружності прямоволокнутої деревини знаходиться в межах від 5921 до 12995 Н·мм⁻², а хвилясто-завилькуватої деревини – від 5053 до 12393 Н·мм⁻².

Ключові слова: ялиця біла; хвилясто-завилькувата деревина; динамічний модуль пружності; об'ємна маса; коефіцієнт згасання.

Вступ. Неруйнівне оцінювання якості деревини є важливою складовою її механічного сортування, що відіграє важливу роль у дерев'яному будівництві та виробництві конструктивних брусів. Так, більшість наукових праць стосуються вивчення модуля пружності як інтегрального показника механічної якості деревини, метою яких було сортування пиломатеріалів за міцністю деревини на класи якості, в їх основі закладено статичне та динамічне навантаження. Чимало таких робіт висвітлюють питання варіації модуля пружності деревини під час статичного згину та на розтяг вздовж волокон. Показники динамічного модуля пружності деревини є дещо більшими, порівняно з аналогічними показниками статичного модуля пружності (Divós & Tanaka, 2005). Акустичний метод визначення модуля пружності деревини є одним із найкращих неруйнівних методів діагностування вад деревини та дефектів композиційних матеріалів (Zhenbo et al., 2005). Відповідно до теоретичних засад, модуль пружності дорівнює добутку об'ємної маси деревини та квадрату швидкості звуку в деревині вздовж волокон (Bucur, 2006; Vintoniv et al., 2007). При цьому кут нахилу мікрофібрил ранньої деревини впли-

ває більше на модуль пружності деревини, ніж пізньої, що пов'язано з його більшою варіацією у ранній деревині річного кільця (Lachenbruch et al., 2010). У деревині більшості хвойних порід встановлено збільшення середнього значення модуля пружності в радіальному напрямку від серцевини до кори (Machado & Cruz, 2005; Beaulieu et al., 2006). Така закономірність зумовлена збільшенням довжини трахеїд у напрямку від серцевини до периферії стовбура та від комлевої частини стовбура до початку його крони (Mvolo et al., 2015). Перехідна зона між ранньою та пізньою деревиною зумовлює характер зміни щільності деревини в межах річного кільця та відповідно визначає властивості деревини, особливо для швидкорослих хвойних видів (Koubaa et al., 2005). Так, під час застосування резонансного методу для визначення динамічного модуля пружності деревини, кореляція між останнім та статичним модулем пружності деревини є більш прогнозована (Bart et al., 2015). Динамічний модуль пружності кільцесудинної та розсіяносудинної деревини знаходять у пряmlinійній залежності від її об'ємної маси (Chauhan & Sethy, 2016).

Інформація про авторів:

Сопушинський Іван Миколайович, д-р с.-г. наук, професор, кафедра ботаніки, деревинознавства та недревних ресурсів лісу.

Email: sopushynskyy@nltu.edu.ua

Мілітц Хольгер, професор, кафедра біології деревини та деревинних продуктів. Email: hmilitz@gwdg.de

Максимчук Руслан Тарасович, аспірант, кафедра ботаніки, деревинознавства та недревних ресурсів лісу.

Email: r.maksymchuk@nltu.edu.ua

Володимир Біцікс, професор, кафедра біології деревини та деревинних продуктів. Email: vbiziks@gwdg.de

Цитування за ДСТУ: Сопушинський І. М., Мілітц Х., Максимчук Р. Т., Біцікс В. Динамічний модуль пружності хвилясто-завилькуватої деревини *Abies Alba* Mill. Науковий вісник НЛТУ України. 2018, т. 28, № 3. С. 52–56.

Citation APA: Sopushynskyy, I. M., Militz, H., Maksymchuk, R. T., Biziks, V. (2018). Dynamic Modulus of Elasticity of Wave-Grained Wood of *Abies Alba* Mill. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(3), 52–56. <https://doi.org/10.15421/40280311>

Мета дослідження – вивчення динамічного модуля пружності прямоволокнутої та хвилясто-завилькуватої деревини в межах радіуса та висоти стовбура *Abies alba* Mill.

Матеріал і методи дослідження. Для дослідження відібрано 12 модельних дерев ялиці білої з прямоволокнутою та хвилясто-завилькуватою деревиною в Лопушниському лісництві ДП "Берегометське лісомисливське господарство" (48°06'02.34" пн.ш. 25°13'02.46"

сх.д., 985 м н.р.м.). Взірці деревини розміром 20×20×360 мм³ (±1 мм) вирізано в напрямку від кори до серцевини та на висотах 1,3 та 7 метрів. Динамічний модуль пружності визначено на приладі Grindo Sonic кафедри біології деревини та лісової продукції Геттінгенського університету ім. Георга Августа, м. Геттінген, Німеччина в рамках Європейської науково-технічної співпраці "COST Action FP1407: ModWoodLife" (рис. 1).



Рис. 1. Прилад Grindo Sonic

В основу методики визначення динамічного модуля пружності закладено повздовжні вібрації. Повздовжній динамічний модуль пружності розраховано за формулою $E_L = 4L^2 f_m^2 \rho / m^2$, де: L – довжина взірця, м; ρ – щільність деревини, кг·м⁻³; f_m – повздовжня резонансна частота коливань у деревині, Гц; m – кількість періодів гармонічних коливань. Абсолютна вологість взірців деревини в момент випробування становила 8 %. Для визначення середньої швидкості звукової хвилі було проведено три удари молотком (рис. 2).

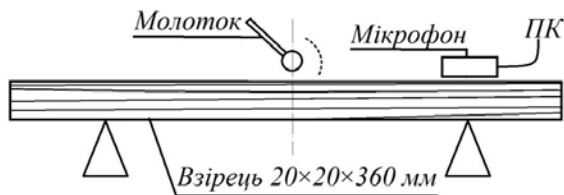


Рис. 2. Схема розміщення взірця деревини під час випробування

Для аналізу резонансних властивостей деревини визначено швидкість звуку (C) та коефіцієнт затухання (K). Взірці деревини виміряно з точністю – 0,01 мм та масу зважено – 0,001 г (Vintoniv et al., 2007).

Результати дослідження та їх обговорення. Відмінність властивостей деревини в межах стовбура та між окремими деревами зумовлює вивчення закономірностей формування якісних характеристик деревини як анізотропного матеріалу. Глобальні кліматичні зміни протягом тривалого часу впливають на ріст та розвиток біологічних видів. Такі фенотипічні відмінні для деревних видів добре відображаються на межі природного ареалу. Структурні відхилення у деревині, які виявляються через зміну лісорослинних умов, визначають фізико-механічні показники деревини, знання яких є важливим під час механічного сортування деревини. Зміну величини динамічного модуля пружності в напрямку від кори до серцевини стовбура дерева та за його висотою наведено на рис. 3.

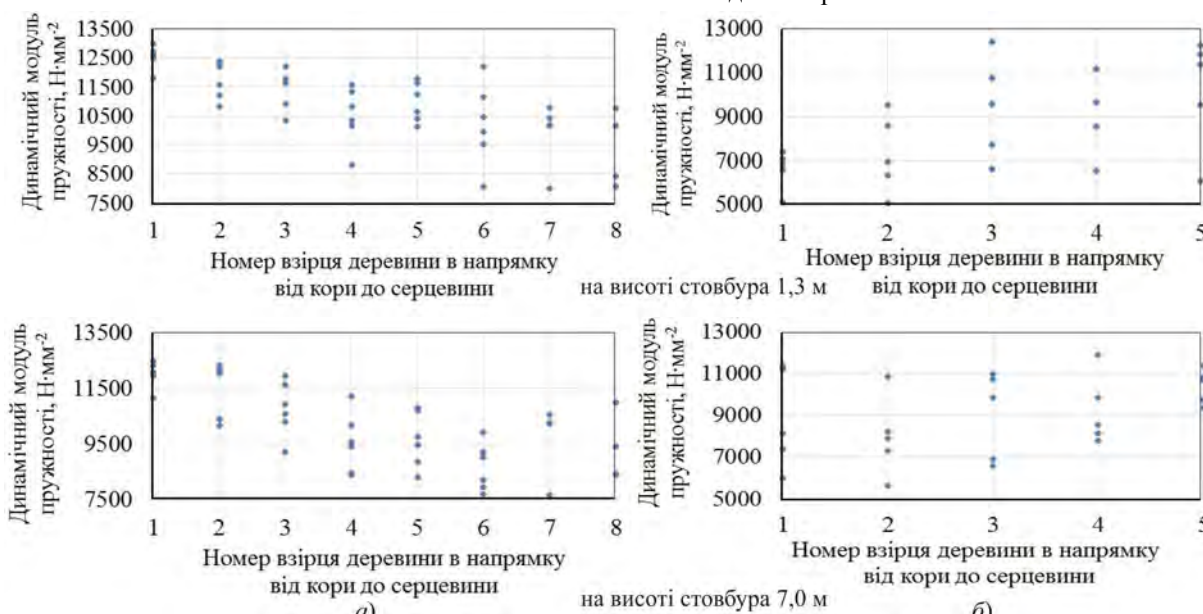


Рис. 3. Динамічний модуль пружності прямоволокнутої (а) та хвилясто-завилькуватої (б) деревини ялиці білої

Графічні дані значень динамічного модуля пружності прямоволокнутої деревини свідчать про його плавне зменшення від периферії до серцевини стовбура, що не є характерним для хвилясто-завилькуватої структури. У межах радіуса стовбура із хвилясто-завилькуватою

структурою можна виділити два класи якості деревини: перший – периферійна деревина з низькими показниками динамічного модуля пружності, тобто 40 % радіуса стовбура; другий – 60 % радіуса центральної (ядрової) деревини, показники якої аналогічні. Для діагностуван-

ня структурних відмінностей деревини важливим показником є коефіцієнт затухання звукових коливань (рис. 4).

Як видно з рис. 2, варіація значень коефіцієнта затухання периферійної зони деревини ялиці білої істотно відрізняється. Так, коефіцієнт затухання взірців деревини

ни із хвилясто-завилькуватою деревиною змінюється від 6 до 10, а для прямоволокнутої деревини – від 12 до 14. З огляду на це прикладного значення набуває встановлення залежності між динамічним модулем пружності та об'ємною масою деревини (рис. 5).

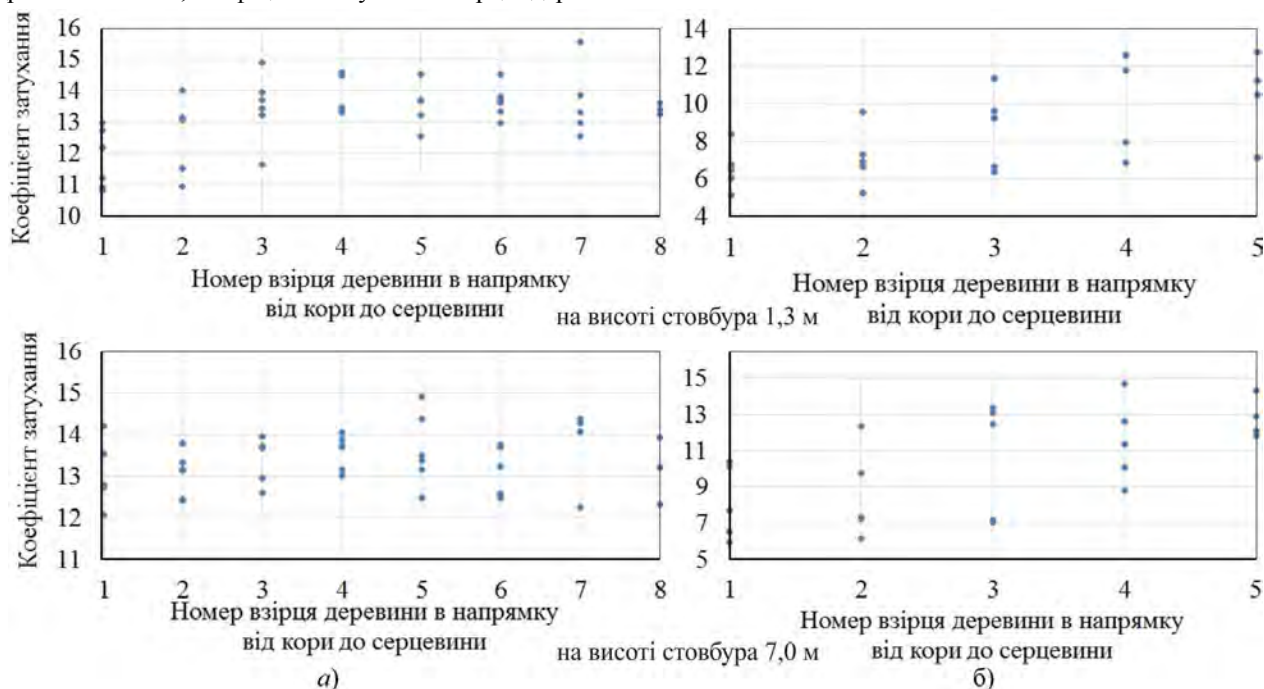


Рис. 4. Коефіцієнт затухання прямоволокнутої (а) та хвилясто-завилькуватої (б) деревини ялиці білої

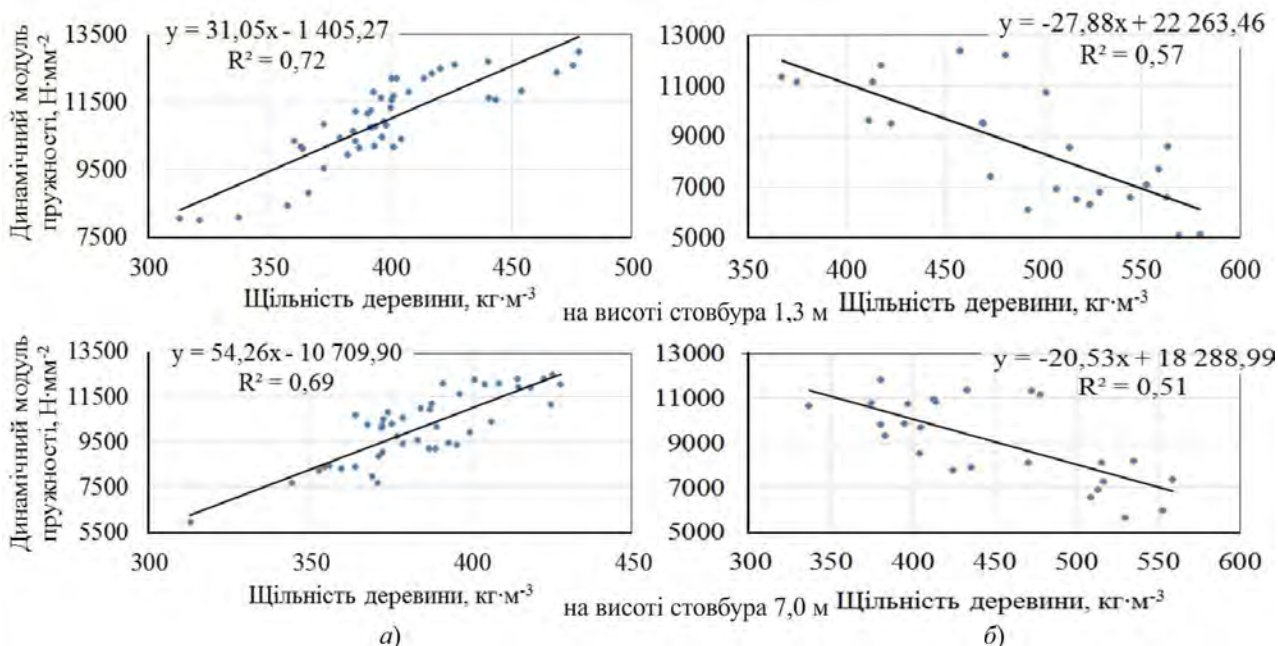


Рис. 5. Залежності між динамічним модулем пружності та щільністю прямоволокнутої (а) та хвилясто-завилькуватої (б) деревини

Прямолінійні рівняння залежності між динамічним модулем пружності та щільністю деревини є важливим інструментарієм під час відбору та сортування деревини за якісними характеристиками. Результати дослідження прямоволокнутої деревини свідчать про збільшення модуля пружності із зростанням величини об'ємної маси, що описується рівнянням прямої для взірців деревини на висоті зрізу 1,3 м – $y=31,05x-1405,27$ ($R^2=0,72$) та 7,0 м – $y=54,26x-10709,90$ ($R^2=0,69$). Проте для хвилясто-завилькуватої деревини ялиці білої закономірність має протилежний характер, а

зокрема із збільшенням її щільності зменшується динамічний модуль пружності. Отже, відмінність структурного впорядкування деревного волокна, а саме його хвилясто-завилькувате розміщення, зумовлює зміну закономірності між фізичними та механічними властивостями деревини.

Варіація показників фізико-механічних властивостей деревини з прямоволокнутою та хвилясто-завилькуватою структурою та їх статистична характеристика має прикладне значення для технологічних процесів її оброблення (табл.).

Табл. Статистична характеристика показників фізико-механічної якості деревини ялиці білої

Висота зрізу стовбура	Показник	N, шт.	min	M^{pm}	max	V, %	P, %
<i>Прямоволокниста структура деревини</i>							
1,3 м	$E_L [Н·мм^{-2}]$	45	7994	$10923^{±191,34}$	12995	11,8	1,8
	K	45	10,8	$13,3^{±0,17}$	16,2	8,4	1,3
	C [M·c ⁻¹]	45	4858	$5239^{±25,49}$	5524	3,3	0,5
	$\rho_{8\%} [кг·м^{-3}]$	45	313	$397^{±5,24}$	478	8,9	1,3
7,0 м	$E_L [Н·мм^{-2}]$	44	5921	$10134^{±235,14}$	12471	15,4	2,3
	K	44	12,1	$13,3^{±0,10}$	14,9	5,1	0,8
	C [M·c ⁻¹]	44	4352	$5118^{±43,70}$	5558	5,7	0,9
	$\rho_{8\%} [кг·м^{-3}]$	44	313	$384^{±3,60}$	427	6,2	0,9
<i>Хвилясто-завилькувата структура деревини</i>							
1,3 м	$E_L [Н·мм^{-2}]$	25	5053	$8576^{±2458,97}$	12393	26,8	5,4
	K	25	5,1	$8,9^{±0,58}$	15,1	32,5	6,5
	C [M·c ⁻¹]	25	2964	$4196^{±160,39}$	5561	19,1	3,8
	$\rho_{8\%} [кг·м^{-3}]$	25	367	$491^{±12,46}$	580	12,7	2,5
7,0 м	$E_L [Н·мм^{-2}]$	25	5626	$9071^{±373,34}$	11859	20,6	4,1
	K	25	6,0	$10,5^{±0,61}$	16,7	28,8	5,8
	C [M·c ⁻¹]	25	3259	$4527^{±145,92}$	5632	16,1	3,2
	$\rho_{8\%} [кг·м^{-3}]$	25	336	$449^{±12,94}$	559	14,4	2,9

Примітка: N – кількість проведених вимірювань; min – мінімальне значення; M^{pm} – середнє арифметичне значення та його помилка; max – максимальне значення; V – коефіцієнт варіації; P – показник точності.

Результати дослідження прямоволокнистої деревини свідчать про те, що її середні значення динамічного модуля пружності, коефіцієнта затухання та швидкості звуку є більшими порівняно з аналогічними показниками для хвилясто-завилькуватої деревини ялиці білої. Динамічний модуль пружності прямоволокнистої деревини знаходиться в межах від 5921 до 12995 Н·мм⁻², а хвилясто-завилькуватої деревини – від 5053 до 12393 Н·мм⁻². Так, середні значення динамічного модуля пружності прямоволокнистої деревини на висоті 1,3 м є на 21,5 % більшими від аналогічного показника для хвилясто-завилькуватої деревини ялиці білої. При чому щільність хвилясто-завилькуватої деревини за вологості 8 % характеризується більшими середніми значеннями порівняно з об'ємною масою прямоволокнистої деревини. Отримані результати досліджень дали змогу встановити істотні відмінності між фізико-механічними характеристиками прямоволокнистої та хвилясто-завилькуватої деревини ялиці білої і визначити залежність між об'ємною масою та динамічним модулем пружності.

Висновки. Результати дослідження динамічного модуля прямоволокнистої та хвилясто-завилькуватої деревини ялиці білої свідчать про таке:

- структурне розміщення деревного волокна ялиці білої визначає діапазон зміни показників динамічного модуля пружності, коефіцієнта затухання та швидкості звуку;

- у межах стовбура дерева більшими значеннями динамічного модуля пружності характеризується периферійна деревина на висоті зрізу 1,3 м;
- збільшення модуля пружності хвилясто-завилькуватої деревини зумовлено зменшенням об'ємної маси деревини ялиці білої та описано рівнянням прямої ($y = -27,88x + 22\,263,46$; $y = -20,53x + 18\,288,99$; $R^2 = 0,51 \dots 0,57$);
- динамічний модуль пружності прямоволокнистої деревини змінюється від 5921 до 12995 Н·мм⁻², а хвилясто-завилькуватої деревини – від 5053 до 12393 Н·мм⁻².

Перелік використаних джерел

- Baltunis, B. S., Wu, H. X., & Powell, M. B. (2007). Inheritance of density, microfibril angle, and modulus of elasticity in juvenile wood of *Pinus radiata* at two locations in Australia. *Can. J. For. Res.*, 37(11), 2164–2174. <https://doi.org/10.1139/X07-061>
- Barr, J., Tippner, J. J., Rademacher, P. (2015). Prediction of mechanical properties – Modulus of Rupture and Modulus of Elasticity – of five tropical species by nondestructive methods. *Maderas-Cienc Tecnol*, 17(2), 239–252. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000023>
- Beaulieu, J., Zhang, S. Y., Yu, Q. B., & Rainville, A. (2006). Comparison between genetic and environmental influences on lumber bending properties in young white spruce. *Wood and Fiber Science*, 38, 553–564.
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood*. 2nd ed. Springer, New York. 360 p.
- Chauhan, Sh., & Sethy, A. (2016). Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity Maderas. *Ciencia y tecnologia*, 18(2), 373–382. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000034>
- Divós, F., & Tanaka, T. (2005). Relation Between Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Wood. *Acta Silv. Lign. Hung.*, 1, 105–110.
- Koubaa, A., Isabel, N., Zhang, S. Y., Beaulieu, J., Bousquet, J. (2005). Transition from juvenile to mature wood in black spruce (*Picea mariana* (Mill)). *Wood and Fiber Science*, 37(3), 445–455.
- Lachenbruch, B., Johnson, G. R., Downes, G. M., & Evans, R. (2010). Relationships of density, microfibril angle, and sound velocity with stiffness and strength in mature wood of Douglas-fir. *Can. J. For. Res.*, 40, 55–64. <https://doi.org/10.1139/X09-174>
- Machado, J. S., & Cruz, H. P. (2005). Within stem variation of maritime pine timber mechanical properties. *Holz Als Roh-und Werkstoff*, 63, 154–159. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0560-4>
- Mvolo, C. S., Koubaa, A., Beaulieu, J., Cloutier, A., Mazerolle, M. J. (2015). Variation in Wood Quality in White Spruce (*Picea Glauca* (Moench) Voss). Part I. Defining the Juvenile – Mature Wood Transition Based on Tracheid Length. *Forests*, 6, 183–202; <https://doi.org/10.3390/f6010183>
- Vintoniy, I. S., Sopushynskyy, I. M., & Teischinger A. (2007). Wood Science. Lviv: Apriori. [In Ukrainian].
- Zhenbo, L., Yixing, L., Haipeng, Y., Junqi, Y. (2005). Measurement of the dynamic modulus of elasticity of wood panels. Translated from *Scientia Silvae Sinicae*, 41(6), 126–131 [译自: 林业科学, 2005, 41(6), 126–131]. <https://doi.org/10.1007/s11461-006-0019-3>

І. М. Сопушинский¹, Х. Милитц², Р. Т. Максъмчук¹, В. Бицик²

¹ Национальный лесотехнический университет Украины, г. Львов, Украина

² Гёттингенский университет им. Георга Августа, г. Гёттинген, Германия

ДИНАМИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ПРОЧНОСТИ ВОЛНИСТО-СВИЛЕВАТОЙ ДРЕВЕСИНЫ *ABIES ALBA* MILL.

Исследованы различия динамического модуля упругости, коэффициента затухания и скорости звука волнисто-свилеватой древесины по сравнению с прямоволокнистой древесиной пихты белой. Изучена вариация физико-механических показателей в пределах радиуса и высоты ствола. В пределах радиуса ствола с волнисто-свилеватой структурой можно выделить два класса качества древесины, а именно: первый – это периферийная древесина (40 % радиуса ствола) и второй – центральная (ядровая) древесина. Структурное размещение древесного волокна, а именно волнисто-свилеватое, существенно определяет физико-механические характеристики и их вариацию. Коэффициент затухания древесины меняется от 6 до 10 для волнисто-свилеватой древесины и от 12 до 14 для прямоволокнистой древесины. Установлена прямолинейная зависимость первого порядка между динамическим модулем упругости и объемной массой древесины. Увеличение объемной массы прямо-

волоконистой древесины приводит к повышению модуля упругости и описывается уравнением прямой ($R^2=0,69\dots0,72$). Прямой зависимости между динамическим модулем упругости и плотностью волнисто-свилеватой древесины является инверсионной. Динамический модуль упругости прямоволоконистой древесины находится в пределах от 5921 до 12995 Н·мм⁻², а волнисто-свилеватой древесины – от 5053 до 12393 Н·мм⁻².

Ключевые слова: пихта белая; волнисто-свилеватая древесина; динамический модуль прочности; объемная масса; коэффициент затухания.

I. M. Sopushynskyy¹, H. Militz², R. T. Maksymchuk¹, V. Biziks²

¹ Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

² Georg-August-University Goettingen, Goettingen, Germany

DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY OF WAVE-GRAINED WOOD OF *ABIES ALBA* MILL.

To get deeper knowledge of wood quality as a practical stage of wood grading, which plays an engineering role in wooden construction and production of structural timber, dynamic module of elasticity of wave-grained wood was investigated. The main objective was focused on testing of Silver fir wood with straight-grained and wave-grained structures within stem radius and height. Altogether, 12 model trees were selected in the forest stand of Bukovyna Carpathians with geographical location of latitude of 48°06'02.34" N, longitude of 25°13'02.46" E and altitude of 985 m asl. Dynamic modulus of elasticity was defined on the Grindo Sonic device of the Department of Wood Biology and Wood Products of Georg-August-Universität Göttingen, Germany within the framework of COST Action FP1407: ModWoodLife. The differences of dynamic modulus of elasticity, damping coefficient and sound velocity between wave-grained and straight-grained wood of Silver fir were estimated. The variation of studied parameters within stem radius and height was graphically analysed. In the stems with wavy-grained wood structure, two wood quality classes were proposed, namely: the first one involved peripheral wood (40 % of the stem radius) and the second one – the central (heart) wood. Wood damping varied from 6 to 10 for wavy-grained wood, and from 12 to 14 for straight-grained wood. The linear relationship between dynamic modulus of elasticity and wood density was estimated. Increasing of wood density caused an increase of the dynamic modulus of elasticity and was described by the linear equation of the first order ($R^2=0.69\dots0.72$). The linear relationship between wood density and dynamic modulus of elasticity of wavy-grained wood was inversely proportional. The dynamic modulus of elasticity of straight-grained wood ranged from 5921 to 12995 Н·мм⁻², and wavy-grained wood – 5053 to 12393 Н·мм⁻².

Keywords: silver fir; wave-grained wood; dynamic module of elasticity; wood density; wood damping.