

6. ДЕРЕВООБРОБНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЛІСОВА ІНЖЕНЕРІЯ



Наукові праці Лісівничої академії наук України
Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.15421/412216>
Article received 2022.11.09
Article accepted 2022.12.29

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
✉ Correspondence author
Pavlo Bekhta
bekhta@ukr.net

103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine

УДК 674-419.32

Механічні властивості фанери, склеєної термопластичною плівкою первинного поліетилену низької густини

П. А. Бехта¹, І. І. Кусняк², О. М. Чернецький³, Н. С. Бехта⁴

Термопластичні плівки – один із перспективних видів клейових матеріалів для виготовлення нетоксичної фанери. У цій роботі запропоновано використання первинної термопластичної плівки поліетилену низької густини (ПЕНГ) для виготовлення фанери. Основним завданням дослідження було з'ясувати механічні властивості фанери, склеєної зі шпону різних порід деревини плівкою ПЕНГ різної товщини. Для кращого розуміння процесу склеювання листів луценого шпону термопластичною плівкою було використано деревину різних порід – тополі, берези, граба та бука, а також різні товщини плівки – 50, 80, 100 і 150 мкм. Для порівняння виготовляли фанеру, склеєну карбамідоформальдегідним клеєм.

Результати дослідження продемонстрували, що зразки фанери з використанням шпону деревини усіх досліджуваних порід, склеєних плівкою ПЕНГ, володіють задовільними механічними властивостями: міцністю на зріз, міцністю на згин та модулем пружності. Встановлено, що така фанера, за значеннями міцності на зріз, має досить високі показники, які перевищують рекомендоване значення міцності 1,0 МПа згідно стандарту EN 314-2. З'ясовано, що порода деревини шпону більшою мірою впливає на механічні властивості фанери, тоді як товщина плівки ПЕНГ впливає меншою мірою. Фанера з тополевого шпону мала найнижчі значення міцності на згин та модуля пружності, крім міцності на зріз, яка була на тому ж рівні, що і для березової та грабової фанери. Зразки букової фанери мали найкращі механічні властивості.

¹ Бехта Павло Антонович – академік Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: +38-032-238-44-99. Факс: +38-032-237-89-05. E-mail: bekhta@ukr.net ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4320-5247>

² Кусняк Ірина Іванівна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: +38-032-238-44-99. E-mail: iryna.rondyak@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3980-3110>

³ Чернецький Орест Миронович – аспірант кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: +38-098-130-18-31. E-mail: Lokioreset@gmail.com

⁴ Бехта Наталія Степанівна – старший викладач кафедри дизайну. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: +38-032-238-44-99. E-mail: natalijabekhta@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4336-2901>

На загал, результати дослідження підтвердили доцільність заміни рідкого термореактивного карбамідоформальдегідного клею на термопластичну плівку ПЕНГ для виготовлення малотоксичної фанери, яку можна застосовувати у виробництві меблів (особливо – дитячих) та оформленні інтер'єру і екстер'єру.

Ключові слова: лущений шпон; деревина різних порід; полімери; плівка ПЕНГ; міцність на зріз; міцність на згин; модуль пружності.

Вступ. З огляду на світову тенденцію виробництва та споживання деревинних композиційних матеріалів (ДКМ), фанерне виробництво є одним із найперспективніших (рис. 1) (FAO, 2021).

Сфера застосування фанери розширюється завдяки її високим фізико-механічним властивостям. В основному, фанеру використовують у будівництві, вагоно- та суднобудуванні, виробництві меблів, дитячих іграшок, для пакування тари тощо.

Однак, впродовж декількох останніх років дедалі більше цінуються екологічні аспекти виробництва ДКМ та продукції на їх основі. Це, з одного боку, посилює привабливість до таких виробів, а з іншого – підштовхує виробників до пошуку нетоксичних клейових матеріалів. Адже відомо, що для виготовлення деревинних композитів використовують переважно синтетичні термореактивні клеї, виготовлені на основі фенолів, карбаміду та фор-

мальдегіду (карбамідоформальдегідні (КФ), фенолоформальдегідні (ФФ) та їхні різновиди).

КФ клеї володіють високою адгезією до деревини, теплостійкістю і добрими діелектричними властивостями, дешеві, недефіцитні, утворюють безбарвні клейові шви та мають високу швидкість затвердіння. Однак недоліками таких клеїв є їхня крихкість, невисока водостійкість, а найголовніше – токсичність. ФФ клеї утворюють клейові з'єднання високої міцності, водо-, атмосферо-, біо- та теплостійкі, стійкі до агресивних середовищ і мають високі діелектричні властивості. Однак вони є дорожчими порівняно з КФ клеями. Загальним недоліком термореактивних клеїв є те, що вони екологічно небезпечні для довкілля і токсичні для людини, тому що випари формальдегіду та інших речовин можуть викликати ракові захворювання (World Health Organization, 2004).

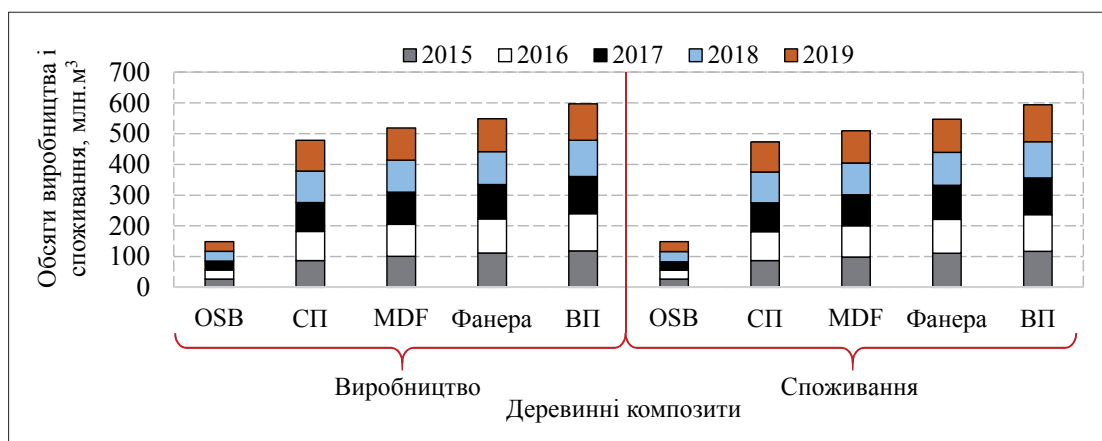


Рис. 1. Обсяги світового виробництва і споживання ДКМ: OSB – орієнтовано-стружкова плита, СП – стружкова плита, MDF – волокниста плита середньої щільності, ВП – волокниста плита

Fig. 1. World production and consumption of wood composites: OSB – oriented strand board, SP – particleboard, MDF – medium density fiberboard, VP – fiberboard

Незважаючи на низку досліджень у напрямі зменшення токсичності клеїв (Hu, Nakao, Nakai, Gu, & Wang, 2005; Huang, & Li, 2008; Kishi et al., 2006; Liu, & Li, 2007; Mittal, & Sharma, 1992; Sowunmi, Ebewe, Conner, & River, 1996; Tohmura, Li, & Qin, 2005; Umemura, Takahashi, & Kawal, 1999), істотного вирішення проблеми виділення формальдегіду з виробів на їхній основі дотепер не існує. Зв'язування його різними добавками, стабілізація процесу поліконденсації термореактивних смол, на жаль, не вирішує головного завдання щодо проблеми екологічності продукції, а лише призводить до підвищення економічних затрат.

Саме тому використання термопластичних плівок у виробництві ДКМ, зокрема фанери, на сьогодні

є актуальним завданням і вимагає проведення досліджень з метою оцінювання її фізико-механічних властивостей. Термопластичні полімери на основі ПЕНГ, поліетилену високої густини (ПЕВГ), поліпропілену (ПП) тощо – не містять формальдегіду, який вважається фактором ризику для здоров'я, особливо тих, хто бере участь у виробничому процесі, а також зручні у використанні (Кусняк, 2020).

Впродовж останніх років здійснюють дослідження, спрямовані на можливість склеювання шпону різними термопластичними плівками у виробництві фанери (Бехта, Кусняк, 2019; Bekhta, & Sedliačik, 2019; Bekhta, Müller, & Hunko, 2020; Chang, Guo, & Tang, 2017; Fang et al., 2012, 2013; Han, & Lee, 1997; Song et al., 2016, 2017). Відмінністю

такого способу склеювання є те, що замість рідкого синтетичного терморективного клею між суміжними листами шпону використовують термопластичну плівку, яка дає змогу усунути з технологічного процесу складні операції приготування та нанесення клею на поверхню шпону. Для склеювання листів шпону у виробництві фанери дослідники пропонують використовувати термопластичні плівки ПЕВГ (Bekhta, & Sedliačik, 2019; Chang et al., 2017; Fang et al., 2012, 2013; Han, & Lee, 1997; Song et al., 2016), ПЕНГ (Bekhta et al., 2020) та ПП (Song et al., 2017).

У низці робіт (Chang et al., 2017; Fang et al., 2012, 2013; Song et al., 2016) для виготовлення шаруватого композиту пропонується використати листи лущеного шпону з деревини тополі і плівку ПЕВГ. Склеювали тришарову або п'ятишарову фанеру. Режим склеювання у кожному дослідженні був різним, оскільки здійснювали пошук оптимального режиму. Витрата плівки ПЕВГ була різною в усіх дослідженнях. Досліджуваними показниками були фізико-механічні властивості композиту. Автори з'ясували, що глибина проникнення розплаву полімеру в структуру шпону збільшується із збільшенням вмісту ПЕВГ, температури і тиску пресування, але не з підвищенням вмісту води, тоді як автори (Han, & Lee, 1997) досліджували адгезійні властивості фанери, виготовленої із лущеного шпону деревини сосни та *halas* підвищеної вологості – 11,4 та 19,6%. Для оцінювання адгезійних властивостей фанери використовували електронну мікроскопію. Встановлено, що показники міцності фанери, склеєної зі шпону різної вологості, не погіршуються і, що полімерна плівка склеює листи шпону за рахунок її проникнення в тріщини (порожнини) та серцевинні промені шпону. Для виготовлення фанери використовували також шпон деревини евкالیпта вологістю 9% та ПП плівку завтовшки 0,04 мм (Song et al., 2017). За результатами досліджень (Chang et al., 2017; Fang et al., 2012, 2013; Han, & Lee, 1997; Song et al., 2016) з'ясовано, що термопластичні плівки можна використовувати як клей у виробництві фанери, оскільки міцність з'єднання відповідає вимогам стандарту GB / T 9846.3 2004.

Науковці (Bekhta, & Sedliačik, 2019) запропонували склеювати фанеру на основі вільхового шпону та ПЕВГ. Для порівняння властивостей фанери, склеєної ПЕВГ, виготовляли фанеру, склеєну КФ і ФФ клеями. У процесі роботи (Bekhta et al., 2020) для виготовлення фанери використовували струганний шпон бука, берези та ялини, склеєних термопластичними плівками LDPE (ПЕНГ), CoPA, CoPE. Встановлено, що фанера, склеєна з листів шпону деревини хвойних порід, має набагато нижчі значення міцності на згин (MOR), модуля пружності (MOE) та міцності на зріз, ніж склеєна з деревини листяних порід. Значення міцності на зріз фанери, склеєної термопластичними плівками, знаходиться в межах від 1,18 до 2,51 МПа. За одержаними результатами (Бехта, Кусняк, 2019; Bekhta et al., 2020), фізико-механічні властивості фанери,

склеєної ПЕВГ та ПЕНГ, відповідають європейському стандарту EN 314-2 для фанери 1 класу.

Проведений аналіз останніх досліджень та публікацій з питання виробництва нетоксичної фанери показав, що отримані результати можна застосовувати у виробничих умовах. Але у виконаних дослідженнях в основному використовували шпон тополі, вільхи та евкالیпту. Тому, враховуючи позитивний досвід науковців, виникає необхідність у подальших дослідженнях щодо оцінювання механічних властивостей фанери, склеєної ПЕНГ, з лущеного шпону деревини тих порід, які найчастіше використовують для її виготовлення (тополя, береза), а також інших порід – бука і граба.

Виконані експериментальні дослідження спрямовані на вирішення *актуальної проблеми* – виробництва фанери зі шпону деревини різних порід на основі нетоксичних плівкових термопластичних полімерів.

Мета дослідження – з'ясувати механічні властивості фанери, виготовленої з лущеного шпону деревини м'яких і твердих листяних порід, склеєного первинною термопластичною плівкою ПЕНГ різних товщин.

Об'єкти і методика досліджень (Objects and methods). *Об'єкт дослідження* – технологічний процес виготовлення фанери з використанням як клею первинної термопластичної плівки ПЕНГ. *Предмет дослідження* – закономірності впливу деревини різних порід і товщини первинної термопластичної плівки ПЕНГ на механічні властивості фанери.

Експериментальні дослідження виконували на лабораторному обладнанні у лабораторії кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу, а також кафедри хімії НЛТУ України (м. Львів). Температуру плавлення плівки ПЕНГ визначено методом візуального спостереження переходу полімеру (плівки) з твердого стану у розплавлений. Методом плоского пресування виготовлено дослідні зразки фанери. Фізичні методи дослідження застосовано для визначення товщини плівки, міцності фанери на зріз, міцності на згин та модуля пружності. Обробку отриманих результатів досліджень здійснено методами статистичного і дисперсійного аналізу.

Для проведення досліджень використовували лущений шпон розміром 300×300 мм тополі, берези, бука і граба завтовшки 0,75 мм, 1,55 мм, 0,45 мм і 1,5 мм відповідно. Вологість лущеного шпону 6±2%. Листи шпону склеювали первинною термопластичною плівкою ПЕНГ (ТОВ «Планета Пластик», м. Ірпінь, Україна) з такими ж розмірами, як шпон, і завтовшки 50, 80, 100 і 150 мкм (густина 0,92 г/см³, температура плавлення – 108°C). Товщини плівки ПЕНГ 50; 80; 100 і 150 мкм рівносильні витраті 46; 73,6; 92 і 138 г/м².

Виготовляли тришарову фанеру. Листи шпону у пакеті вкладали із взаємно перпендикулярним напрямком волокон деревини у суміжних шарах. Між суміжними листами шпону вкладали первинну тер-

мопластичну плівку ПЕНГ (замість нанесення шару рідкого клею). Сформований пакет шпону склеювали за таких режимних параметрів: тиск пресування – 1,4 МПа; температура пресування – 160°C; тривалість пресування – 4,5 хв. Після гарячого пресування фанеру піддавали стадії холодного пресування за тиску 0,7 МПа впродовж 5 хв за кімнатної температури, щоб зменшити її жолоблення та напруження. Після цього виготовлені 24 листи фанери кондиціонували сім діб за температури $20 \pm 2^\circ\text{C}$ та вологості $65 \pm 5\%$. Міцність фанери на зріз, міцність на згин та модуль пружності визначали згідно до стандартів (EN 314-1 (2004); EN 314-2 (1993); EN 310 (1993)) (рис. 2).

Міцність на зріз визначали після попередньої обробки для склеювання класу 1 – сухі умови, де зразки фанери занурювали у воду за температури $20 \pm 2^\circ\text{C}$ на 24 години. Для порівняння результатів виготовляли фанеру з використанням КФ клею на основі карбамідоформальдегідної смоли марки КФ-МТ. Для приготування клею використовували 20%-ий розчин хлориду амонію як затверджувач та каолін, як наповнювач. Листи фанери, склеєні КФ-МТ клеєм, були виготовлені відповідно до параметрів пресування, які використовують у промислових умовах: тиск пресування – 1,8 МПа; температура пресування – 110°C; тривалість пресування – 6 хв, витрата клею – 110 г/м².

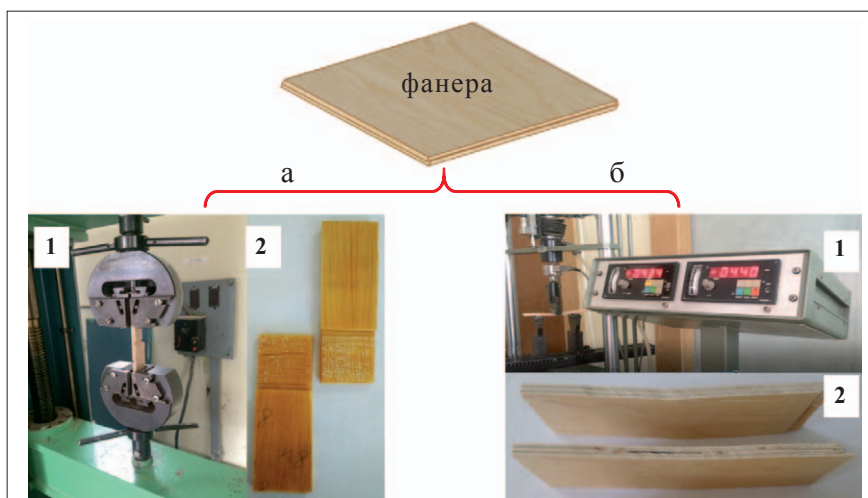


Рис. 2. Робочий момент випробування зразків фанери: а) визначення міцності на зріз; б) визначення міцності на згин та модуля пружності: 1 – зразок фанери в момент випробування; 2 – зразок фанери після випробування

Fig. 2. Working moment of testing plywood samples: a) determination of shear strength; b) determination of bending strength and modulus of elasticity: 1 – sample of plywood at the time of testing; 2 – plywood sample after testing

Статистичну обробку отриманих результатів проводили за допомогою програмного забезпечення SPSS версії 22 (IBM Corp., Armonk, NY, USA).

Результати (Results). Для з'ясування впливу породи деревини і товщини термопластичної плівки на механічні властивості фанери, виготовленої на основі первинної термопластичної плівки ПЕНГ, було проведено числову обробку отриманих результатів досліджень за допомогою аналізу ANOVA (англ. *Analysis of Variance*), результати якого наведено у табл. 1. Результати тесту ANOVA підтверджують, що порода деревини і товщина термопластичної плівки ПЕНГ мають статистично достовірний вплив на механічні властивості фанери ($p = 0,001 < 0,05$). За критерієм Фішера (F) встановлено, що порода деревини і товщина плівки суттєво впливають на всі механічні показники фанери.

Вплив породи деревини і товщини плівки на міцність фанери на зріз. Основним механічним показником, за яким оцінюють якість склеювання, є міцність на зріз, яку визначають згідно з положеннями стандарту EN 314-1. Згідно вимог стандарту EN 314-2, значення міцності на зріз для 1 класу з'єднання повинні бути вищими за 1,0 МПа.

На рис. 3 наведені порівняльні показники міцності на зріз фанери з лущеного шпону різних деревних порід, склеєного первинною термопластичною плівкою ПЕНГ різної товщини.

Отримані середні значення міцності фанери на зріз знаходяться в межах від 0,94 до 1,31 МПа для грабового шпону; від 1,03 до 1,44 МПа – для тополевого шпону; від 1,13 до 1,36 МПа – для березового шпону; від 1,54 до 1,77 МПа – для букового шпону. Усі значення міцності на зріз відповідають вимогам стандарту EN 314-2, окрім середнього значення зразків фанери, склеєних з листів грабового шпону термопластичною плівкою ПЕНГ завтовшки 80 мкм. Найвищі середні значення міцності було отримано для тополевої та букової фанери, склеєної плівкою ПЕНГ завтовшки 150 мкм – від 1,44 та 1,77 МПа відповідно, тоді як найменші показники міцності було зафіксовано для зразків фанери, склеєної плівкою ПЕНГ завтовшки 50 і 80 мкм – від 1,03 до 1,59 МПа відповідно.

Як бачимо з рис. 3, а також за результатами дисперсійного аналізу, вплив породи деревини і товщини плівки ПЕНГ на межу міцності на зріз фанери є суттєвим ($p = 0,001 \leq 0,05$) (див. табл. 1).

Проте, найбільший вплив на показники міцності фанери на зріз чинить порода деревини ($F = 81,526$). Відомо, що деревина є пористим матеріалом, тому проникнення в'язкотекучого розплаву полімеру в клітинну структуру відіграє важливе значення для забезпечення міцного механічного блокування (Chang et al., 2017). Використаний грабовий шпон для досліджень мав найбільшу щільність і товщину, що могло спричинити погіршення проникнення в'язкотекучого полімеру в структуру шпону через

високу в'язкість ПЕНГ. В загальному, прослідковується тенденція до збільшення показника міцності фанери на зріз зі збільшенням товщини досліджуваної плівки ПЕНГ. Це властиво відбувається внаслідок більшого заповнення кількості порожнин і клітин шпону полімером, що дає змогу утворювати міцне механічне блокування (Bekhta et al., 2022; Bekhta, & Sedliačik, 2019; Chang et al., 2017; Fang et al., 2013; Kajaks et al., 2012, 2014; Mittal, & Sharma, 1992; Smith Dai, & Ramani, 2002; Song et al., 2016).

Таблиця 1. Вплив змінних факторів на механічні властивості фанери

Table 1. The influence of variable factors on the mechanical properties of plywood

№ з.п.	Залежна змінна	Факторна взаємодія	Значення F – статистики	Значущість (P)
1	Міцність фанери на зріз	Порода деревини	81,526	0,001*
		Товщина плівки ПЕНГ	16,413	0,001*
		Порода деревини × Товщина плівки	3,355	0,001*
2	Міцність фанери на згин	Порода деревини	162,251	0,001*
		Товщина плівки ПЕНГ	6,773	0,001*
		Порода деревини × Товщина плівки	5,440	0,001*
3	Модуль пружності фанери	Порода деревини	136,243	0,001*
		Товщина плівки ПЕНГ	6,303	0,001*
		Порода деревини × Товщина плівки	1,536	0,150**

Примітка. * – суттєва різниця на рівні 5 % ($P \leq 0,05$); ** – несуттєва різниця

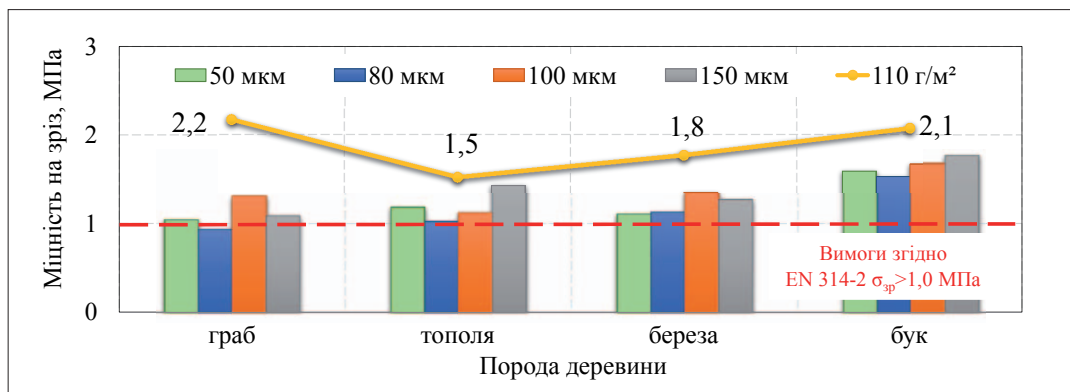


Рис. 3. Вплив породи деревини і товщини первинної плівки ПЕНГ на міцність фанери на зріз

Fig. 3. The influence of wood species and thickness of primary LDPE film on shear strength of plywood

Співставлення результатів середніх значень міцності фанери на зріз, склеєної плівкою ПЕНГ та КФ-МТ, вказує на відмінність між показниками, що можна пояснити більшою щільністю фанери, склеєної КФ-МТ клеєм, порівняно із фанерою, склеєною полімерною плівкою ПЕНГ (Bekhta et al., 2022).

Вплив породи деревини і товщини плівки на міцність фанери на згин та модуль пружності. Згідно результатів аналізу ANOVA, обидва змінні фактори (порода деревини і товщина плівки ПЕНГ) суттєво впливають на міцність фанери на згин і модуль пружності ($p \leq 0,05$). Найбільший вплив на показники міцності на згин і модуль пружності має поро-

да деревини, де $F = 162,251$ та $F = 136,243$ відповідно (див. табл. 1).

Середні значення показників міцності на згин найбільші для фанери з грабового шпону (129,5 МПа), а найменші – для тополевого (60,5 МПа) (рис. 4). Показники модуля пружності найбільші для зразків фанери з грабового та букового шпону (11 464,4 МПа і 13 830,8 МПа, відповідно), тоді як найменші – для фанери з березового і тополевого шпону (7 8064,4 МПа і 12 390,5 МПа, відповідно) (рис. 5).

Встановлено, що із збільшенням товщини плівки від 50 до 150 мкм показники міцності фане-

ри на згин зростають: для тополевої – від 60,47 до 63,8 МПа (на 5,5%), для березової – від 63,7 до 102,65 МПа (на 61,1%), для букової – від 82,96 МПа до 93,57 МПа (на 12,8%) і для грабової фанери – від 113,55 МПа до 129,45 МПа (на 14,0%) (див. рис. 4).

Подібну тенденцію підвищення значень спостережено для модуля пружності фанери: для тополевої – від 7 806,4 до 8 351,8 МПа (на 7,0%), для березової – від 10 038,0 до 12 390,5 МПа (на 23,4%), для букової – від 13 654,3 до 13 763,4 МПа (на 0,8%) і

для грабової фанери – від 11 464,5 до 13 352,1 МПа (на 16,5%) (див. рис. 5). Цей аспект можна пояснити тим, що зі збільшенням товщини плівки зростає витрата полімеру, що покращує заповнення ним порожнин і клітин деревини. Таким чином, відбувається механічне зчеплення шляхом формування клейових замків (Chang et al., 2017; Fang et al., 2013; Goto, Saiki, & Onishi, 1982; Kajaks et al., 2012; Lustosa, Menezzi, & Melo, 2015; Smith et al., 2002; Song et al., 2017).

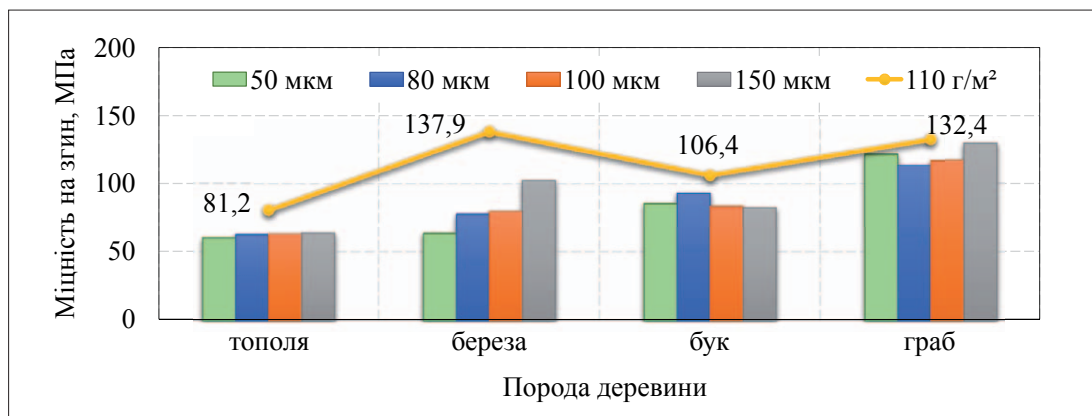


Рис. 4. Вплив породи деревини і товщини первинної плівки ПЕНГ на міцність фанери на згин

Fig. 4. The influence of wood species and thickness of primary LDPE film on bending strength of plywood

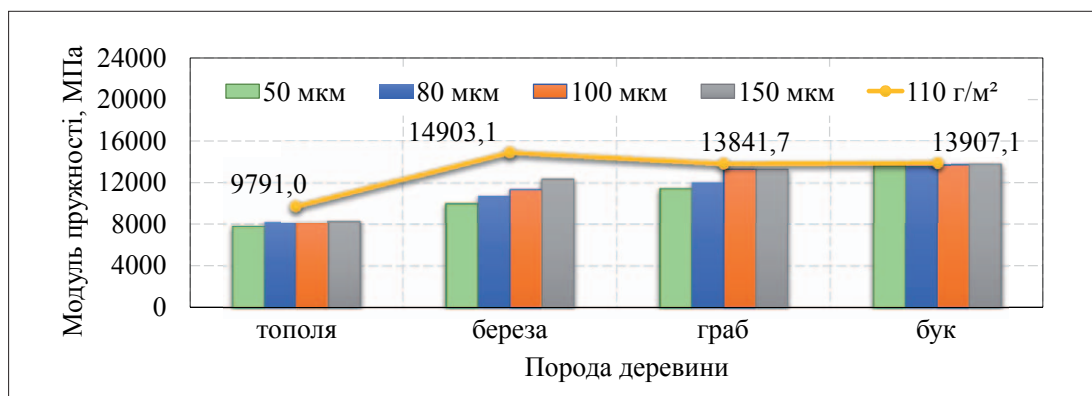


Рис. 5. Вплив породи деревини і товщини первинної плівки ПЕНГ на модуль пружності фанери

Fig. 5. The influence of wood species and thickness of primary LDPE film on modulus of elasticity of plywood

Варто зауважити, що показники міцності на згин і модуль пружності є найбільші для фанери, склеєної із букового та грабового шпону, адже вони мають більшу щільність, порівняно з деревиною тополі. Цікавим є те, що показники міцності на згин березової і тополевої фанери, склеєної термопластичною плівкою завтовшки 50 мкм, є майже однаковими – 63,7 та 60,47 МПа, відповідно. Цей аспект вказує на те, що, крім щільності деревини, на показники міцності впливає ще й товщина шпону.

Окрім того, для фанери зі шпону деревини листяних порід, склеєного КФ-МТ клеєм, найбільші показники міцності на згин встановлено для грабової (132,4 МПа), а найменші – для тополевої фанери (81,2 МПа), що можна пояснити більшою щільністю грабової фанери (819,4 кг/м³). Той факт, що по-

казники модуля пружності фанери зі шпону деревини листяних порід, склеєного плівкою ПЕНГ, дещо нижчі, ніж для фанери на основі КФ-МТ клею, є досить важливим моментом для виготовлення різних гнутих складних конструкцій.

Дискусія (Discussion). Дослідження показали, що фанера з використанням як клею термопластичної плівки ПЕНГ, за значеннями міцності на зріз хоч і поступається фанері на основі термореактивного клею КФ-МТ (див. рис. 3), але ці значення перевищують рекомендоване значення міцності 1,0 МПа згідно стандарту EN 314-2. Крім того, така фанера практично не містить вільного формальдегіду (Bekhta et al., 2022; Cui, Song, & Zhang, 2010). Значення міцності на статичний згин і модуля пружності фанери з використанням термопластичної

плівки співставні з аналогічними значеннями для фанери з використанням КФ-МТ клею. Одержані результати порівнювали також з результатами

досліджень інших науковців (Бехта, Кусняк, 2019; Bekhta, & Sedliačik, 2019; Fang et al., 2012, 2013; Lustosa et al., 2015; Song et al., 2017) (табл. 2).

Таблиця 2. Механічні властивості фанери на основі термопластичних полімерів

Table 2. Mechanical properties of plywood based on thermoplastic polymers

Показник	Вид полімеру						
	ПЕВГ ¹	ПЕВГ ²	ПЕВГ ³	ПЕВГ ⁴	ПЕНГ ⁵	ПП ⁶	ПЕНГ ⁷
Порода деревини	амескла	тополя	тополя	вільха	береза	евкаліпт	тополя, береза, бук, граб
Товщина фанери, мм	12-16	8	4,5	4,6	7,5	7-8	1,31-4,62
Межа міцності на зріз, МПа	2,32	1,46	1,15	2,38	1,56	1,41	0,94-1,77
Межа міцності під час згину, МПа	91,0	82,78	62,0	119,3	105,83	106,0	60,47-129,45
Модуль пружності, $\times 10^3$ МПа	10,83	7,48	6,42	9,51	10,50	13,70	7,81-13,83

Примітка. 1. ПЕВГ – поліетилен високої густини (Lustosa et al., 2015); 2. ПЕВГ – поліетилен високої густини (Fang et al., 2013); 3. ПЕВГ – поліетилен високої густини (Fang et al., 2012); 4. ПЕВГ – поліетилен високої густини (Bekhta, & Sedliačik, 2019); 5. ПЕНГ – поліетилен низької густини (Бехта, Кусняк, 2019); 6. ПП – поліпропілен (Chang et al., 2017); 7. ПЕНГ – поліетилен низької густини (отримані результати досліджень).

Таке порівняння показало, що механічні показники фанери залежать від породи деревини, виду термопластичної плівки, товщини плівки і товщини фанери. Зокрема, було відзначено (Bekhta et al., 2020), що порода деревини і вид термопластичного полімеру значно впливають на фізико-механічні властивості фанери. У своїх дослідженнях науковці для виготовлення фанери використовували струганий шпон бука, берези та ялини, склеєний різними термопластичними плівками – LDPE (ПЕНГ), CoPA і CoPE. Було встановлено, що фанера, склеєна з листів ялинового шпону, має набагато нижчі значення міцності на згин (MOR), модуля пружності (MOE) та міцності на зріз, ніж склеєна з букового і березового шпону. З погляду міцності склеювання, плівка CoPA найкраще склеювала буковий і березовий шпон, тоді як плівка CoPE – ялиновий. Найнижчу міцність на зріз продемонстрували зразки фанери, склеєні LDPE.

Отже, за результатами досліджень отримано і встановлено динаміку фізико-механічних властивостей фанери та з'ясовано, що термопластичну плівку ПЕНГ можна використовувати для склеювання як хвойних, так і листяних порід деревини.

Висновки (Conclusions). На підставі отриманих результатів можна констатувати, що використання первинної плівки ПЕНГ для склеювання шпону з деревини листяних порід є доволі актуальним з погляду екологічності і доступності. Встановлено, що фанера зі шпону деревини листяних порід, склеєного плівкою ПЕНГ, володіє задовільними механічними показниками залежно від використовуваної товщини полімеру. Плівку ПЕНГ завтовшки 80, 100 і 150 мкм можна успішно використовувати для склеювання фанери з використанням шпону з деревини

різних порід – бука, граба, берези, тополі. Порода деревини істотно впливає на механічні властивості фанери. Висока щільність деревини бука, граба і берези забезпечує фанеру високими показниками модуля пружності. Товщина шпону та кількість полімеру (товщина), яка проникає в структуру деревини, суттєво впливає на показники міцності фанери на зріз. Зразки букової фанери мали найвищі механічні показники. Значення механічних показників фанери збільшуються із збільшенням товщини плівки ПЕНГ від 50 до 150 мкм.

Заміна термореактивних клеїв у технології виготовлення фанери термопластичними плівками ПЕНГ відкриває широкий спектр привабливих перспектив, зокрема для виготовлення гнотоклеєних виробів. Такий спосіб виробництва фанери дасть змогу виготовляти малотоксичну продукцію із задовільними фізико-механічними показниками.

Список літератури (References)

- Бехта, П. А., Кусняк, І. І. (2019). Властивості фанери з використанням як клею термопластичної плівки. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 19, 209-222 [Bekhta, P. A., & Kusniak, I. I. (2019). The properties of plywood with thermoplastic film using as glue. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 19, 209-222. <https://doi.org/10.15421/411943>] (in Ukrainian)
- Кусняк, І. І. (2020). Ефективність виробництва фанери склеєної термопластичною плівкою. *Науковий вісник НЛТУ України*, 30(2), 88-92 [Kusniak, I. I. (2020). Efficiency of the glued plywood production with thermoplastic film. *Scientific Bulletin of Ukrai-*

- nian National Forestry University, 30(2), 88-92. <https://doi.org/10.36930/40300216>] (in Ukrainian)
- Bekhta, P., Chernetskyi, O., Kusniak, I., Bekhta, N., & Bryn, O. (2022). Selected Properties of Plywood Bonded with Low-Density Polyethylene Film from Different Wood Species. *Polymers*, 14(51), 1-13. <https://doi.org/10.3390/polym14010051>
- Bekhta, P., Pizzi, A., Kusniak, I., Bekhta, N., Chernetskyi, O., & Nuryawan, A.A. (2022). Comparative Study of Several Properties of Plywood Bonded with Virgin and Recycled LDPE Films. *Materials*, 15, 4942, 1-15. <https://doi.org/10.3390/ma15144942>
- Bekhta, P., & Sedliačik, J. (2019). Environmentally-Friendly High-Density Polyethylene-Bonded Plywood Panels. *Polymers (Basel)*, 11(7), 1166, 1-21. <https://doi.org/10.3390/polym11071166>
- Bekhta, P., Müller, M., & Hunko, I. (2020). Properties of Thermoplastic-Bonded Plywood: Effects of the Wood Species and Types of the Thermoplastic Films. *Polymers*, 12(11), 2582, 1-19. <https://doi.org/10.3390/polym12112582>
- Chang, L., Guo, W., & Tang, Q. (2017). Assessing the tensile shear strength and interfacial bonding mechanism of poplar plywood with high-density polyethylene films as adhesive. *BioResources*, 12(1), 571-585. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.571-585>
- Cui, T., Song, K., & Zhang, S. (2010). Research on utilizing recycled plastic to make environment-friendly plywood. *Forestry Studies in China*, 2(4), 218-222. <https://doi.org/10.1007/s11632-010-0401-y>
- EN 310 (1993). Wood-Based Panels—Determination of Modulus of Elasticity in Bending and of Bending Strength. [Published 1993-15-04]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization
- EN 314-1 (2004). Plywood—Bonding Quality—Part 1: Test Methods. [Published 2006-01-16]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization
- EN 314-2 (1993). Plywood—Bonding Quality—Part 2: Requirements. [Published 1993-15-04]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization
- Fang, L., Chang, L., Guo, W., Chen, Y., & Wang, Z. (2012). Manufacture of environmentally friendly plywood bonded with plastic film. *Forest Products Journal*, 63(7/8), 283-288. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-12-00062>
- Fang, L., Chang, L., Guo, W., Ren, Y., & Wang, Z. (2013). Preparation and characterization of wood-plastic plywood bonded with high density polyethylene film. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71, 739-746. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0733-0>
- FAO (2021). Yearbook of Forest Products 2019. Retrieved from <https://www.fao.org/3/cb3795m/cb3795m.pdf>
- Goto, T., Saiki, H., & Onishi, H. (1982). Studies on wood gluing. XIII: Gluability and scanning electron microscopic study of wood-polypropylene bonding. *Wood Sci. Technol.*, 16, 293-303. <https://doi.org/10.1007/BF00353157>
- Han, K.-S., & Lee, H.-H. (1997). Adhesion characteristics and anatomic scanning of plywood bonded by high density polyethylene. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 25(3), 16-23. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/264102161_Adhesion_Characteristics_and_Anatomic_Scanning_of_Plywood_Bonded_by_High_Density_Polyethylene
- Hu, Y., Nakao, T., Nakai, T., Gu, J., & Wang, F. (2005). Vibrational properties of wood plastic plywood. *Journal of Wood Science*, 51(1), 13-17. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0624-9>
- Huang, J., & Li, K. (2008). A new soy flour-based adhesive for making interior type II plywood. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 85, 63-70. <https://doi.org/10.1007/s11746-007-1162-1>
- Kajaks, J., Kalniņš, K., Reihmane, S., & Bernava, A. (2014). Recycled thermoplastic polymer hot melts utilization for birch wood veneer bonding. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 30(2), 87-102. <https://doi.org/10.1177/147776061403000>
- Kajaks, J., Reihmane, S., Grinbergs, U., & Kalniņš, K. (2012). Use of innovative environmentally friendly adhesives for wood veneer bonding. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 61(3), 207-211. <https://doi.org/10.3176/proc.2012.3.10>
- Kishi, H., Fujita, A., Miyazaki, H., Matsuda, S., & Murakami, A. (2006). Synthesis of wood-based epoxy resins and their mechanical and adhesive properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 102(3), 2285-2292. <https://doi.org/10.1002/app.24433>
- Liu, Y.J., & Li, K. (2007). Development and characterization of adhesives from soy protein for bonding wood. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27(1), 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.12.004>
- Lustosa, ECB, Del Menezzi, CHS, de Melo, R.R. (2015). Production and properties of a new wood laminated veneer/high-density polyethylene composite board. *Materials Research*, 18(5), 994-999. <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.010615>
- Mittal, M., & Sharma, C.B. (1992). Studies on lignin-based adhesives for plywood panels. *Polymer International*, 29(1), 7-8. <https://doi.org/10.1002/pi.4990290103>
- Smith, M.J., Dai, H., & Ramani, K. (2002). Wood-thermoplastic adhesive interface-method of characterization and results. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 22(3), 197-204. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(01\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(01)00055-0)
- Song, W., Wenbang, W., Congrong, R., & Shuangbao, Z. (2016). Developing and evaluating composites based on plantation eucalyptus rotary-cut veneer and high-density polyethylene film as novel building materials. *BioResources*, 11(2), 3318-3331. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3318-3331>
- Song, W., Wenbang, W., Xuefei, L., & Shuangbao, Z. (2017). Utilization of polypropylene film as an

- adhesive to prepare formaldehyde-free, weather-resistant plywood-like composites: Process optimization, performance evaluation, and interface modification. *BioResources*, 12(1), 228-254. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.228-254>
- Sowunmi, S., Ebewe, R. O., Conner, A. H., & River, B. H. (1996). Fortified mangrove tannin-based plywood adhesive. *Journal of Applied Polymer Science*, 62, 577-584. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19961017\)62:33.3.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19961017)62:33.3.CO;2-X)
- Tohmura, S. I., Li, G. Y., & Qin, T. F. (2005). Preparation and characterization of wood polyalcohol-based isocyanate adhesives. *Journal of Applied Polymer Science*, 98, 791-795. <https://doi.org/10.1002/прим.22072>
- Umemura, K., Takahashi, A., & Kawal, S. (1999). Durability of isocyanate resin adhesives for wood. II. Effect of the addition of several polyols on the thermal properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 74(7), 1807-1814. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19991114\)74:7<1807::AID-APP24>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19991114)74:7<1807::AID-APP24>3.0.CO;2-0)
- World Health Organization (2004). IARC classifies formaldehyde as carcinogenic to humans. International Agency for Research on Cancer. Retrieved from www.iarc.fr/ENG/Press-Releases/archives/pr153a

Mechanical properties of plywood glued with the use of thermoplastic film of primary low density polyethylene

P. Bekhta¹, I. Kusniak², O. Chernetskyi³, N. Bekhta⁴

The plywood industry still most often uses phenol-formaldehyde (PF) and urea-formaldehyde (UF) resins. In Ukraine, 55-60 % of plywood products are made using thermosetting UF resins, and 40-45 % of plywood products are made using – PF resins. However,

their main disadvantage is formaldehyde emission. In addition, formaldehyde is emitted during the operation of plywood and other wood-based composite materials. This study is focused on the use of thermoplastic films in plywood technology as an alternative to replacing liquid thermoreactive and toxic adhesives.

In this paper, the use of thermoplastic films of primary low-density polyethylene (LDPE) for gluing veneer in the production of plywood is offered. The aim of the study was to determine the mechanical properties of plywood, such as shear strength, bending strength and modulus of elasticity, made of peeled veneer of different wood species bonded with primary LDPE film of different thicknesses. For a better understanding of the gluing process of veneer with a thermoplastic film, different wood species were proposed – poplar, birch, hornbeam and beech, as well as different thicknesses of the film – 50, 80, 100, and 150 μm . The obtained results were compared with the properties of plywood glued with UF adhesive.

The quality of bonding was evaluated by the shear strength value, which was determined in accordance with the EN 314-1 standard. The results of this study showed that the plywood samples made from veneer of various wood species and glued with primary LDPE thermoplastic film have satisfactory mechanical properties. It was found that the shear strength of plywood made from poplar, birch, hornbeam and beech veneer and glued with a primary LDPE thermoplastic film of different thicknesses meets the EN 314-1 standard for bonding class 1: dry conditions. It was also found that the wood species and thickness of the film significantly ($p \leq 0.05$) affects the mechanical properties of plywood. The plywood made from poplar veneer had the lowest values of bending strength and modulus of elasticity, in addition to the shear strength values, which were at the same level as for birch and hornbeam plywood. Beech plywood samples had the best mechanical properties. Increasing the thickness of the LDPE film improved the mechanical properties of the wood composite.

The values of mechanical properties meet the requirements of appropriate standards and confirm the suitability of using the thermoplastic film as adhesive instead of conventional UF adhesive for manufacture of plywood and its application under dry conditions. The production of plywood using thermoplastic films as an adhesive in comparison with the production of plywood glued with UF adhesive has a number of advantages due to the absence of: operations for preparing liquid glue; equipment for applying liquid glue to the veneer surface; washing the technological line for preparation and supply of glue; the need to clean equipment for applying glue; the need for disposal of waste resins and adhesives; emission of harmful fumes of formaldehyde and ammonia. However, further study should be done to solve the problem of poor compatibility of wood and LDPE film, which will help to expand their scope of application.

Key words: rotary-cut veneer; wood species; polymers; LDPE film; shear strength; bending strength; modulus of elasticity.

¹ Pavlo Bekhta – Full Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Wood-Based Composites, Cellulose and Paper. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. Tel.: +38-032-238-44-99, E-mail: bekhta@ukr.net ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4320-5247>

² Iryna Kusniak – PhD in Technical Sciences, Senior lecturer at the Department of Wood-Based Composites, Cellulose and Paper. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. Tel.: +38-032-238-44-99. E-mail: iryna.rondyak@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3980-3110>

³ Orest Chernetskyi – Postgraduate student at the Department of Wood-Based Composites, Cellulose and Paper. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. Tel.: +38-098-130-18-31. E-mail: Lokioest@gmail.com

⁴ Nataliya Bekhta – Senior lecturer of the Department of Design. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. Tel.: +38-032-238-44-99. E-mail: natalijabekhta@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4336-2901>