

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/10.15421/412314>
Article received 2023.05.23
Article accepted 2023.11.23

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

Вплив модифікування шпону на властивості фанери, склеєної термопластичною плівкою ПЕНГ

П. А. Бехта¹, І. І. Кусняк², О. М. Чернецький³, Н. С. Бехта⁴, Р. О. Козак⁵,
О. І. Бринь⁶, М. М. Копанський⁷

Фанера, склеєна з використанням як клею термопластичних плівок, є перспективним матеріалом у меблевому виробництві. Проте такий вид деревинного композиту володіє нижчою водостійкістю порівняно з композитами на основі термореактивних клеїв. Крім того, для термопластичних полімерів властива низька адгезія до деревини. У цій роботі, для покращення адгезії термопластичного полімеру до деревини, запропоновано модифікувати луцений березовий шпон лимонною кислотою концентрацією 5, 15 та 25%. Витрата розчину

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>

⁵ Козак Руслан Олегович – доктор технічних наук, професор 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: kozak_r@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1297-9810>

⁶ Бринь Оlesia Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент 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: churylo_olesya@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9324-8093>

⁷ Копанський Микола Михайлович – кандидат технічних наук, доцент 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: m_kopansky@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3897-4818>

кислоти становила – 50, 100 та 150 г/м². Як клей використовували термопластичну плівку поліетилену низької густини (ПЕНГ) товщиною 100 мкм. Для порівняння отриманих результатів виготовляли фанеру з немодифікованого шпону, склеєну плівкою ПЕНГ та карбамідоформальдегідним клеєм марки КФ-МТ.

Результати дослідження показали, що модифікування шпону лимонною кислотою позитивно впливає на властивості фанери. Встановлено, що показники водопоглинання і набрякання за товщиною фанери – зменшуються (покращуються), а міцність на зріз та згин – збільшуються. Зокрема виявлено, що фанера зі шпону, модифікованого 15%-ним розчином лимонної кислоти, володіє найнижчою адсорбцією води (38,5-39,24%). Максимальна міцність фанери на зріз становила 2,11 МПа. Концентрація розчину лимонної кислоти суттєво впливає на властивості фанери, тоді як витрата речовини – не впливає.

Модифікування шпону лимонною кислотою у виробництві фанери, склеєної плівкою ПЕНГ, має значний потенціал внаслідок її екологічності, доступності, вартості та здатності покращувати властивості фанери, що є важливим аспектом для збереження високих експлуатаційних характеристик продукції.

Ключові слова: фанера; лущений шпон; модифікування шпону; лимонна кислота; термопластична плівка; водопоглинання; набрякання за товщиною; міцність на зріз; міцність на згин; модуль пружності.

Вступ. Фанера є одним із найпоширеніших видів шаруватої клеєної деревини, яку широко застосовують як конструкційний матеріал. Вона складається зі склеєних між собою трьох і більше листів лущеного шпону із взаємно перпендикулярним розташуванням волокон деревини у суміжних шарах. Сфери її використання постійно розширюються, тому виробництво та споживання цієї продукції ростуть великими темпами (FAO, 2020).

Дотримуючись сучасних тенденцій, найважливішим питанням, яке привертає все більшу увагу у виробництві деревинних композиційних матеріалів (ДКМ), зокрема й фанери, є екологічність продукції. Враховуючи той факт, що фанеру здебільшого склеюють за допомогою термореактивних смол (фенолоформальдегідних (ФФ) та карбамідоформальдегідних (КФ)) на основі формальдегіду, це ускладнює її використання для внутрішніх потреб. Адже постійне виділення формальдегіду в приміщенні згодом призводить до захворювання, яке називається синдромом хворого будинку, за якого мешканець відчуває різні симптоми – головну біль, подразнення в носі, горлі та втому (Kanazawa et al., 2010). Крім того, Всесвітня організація охорони здоров'я (World Health Organization, 2004) також прийшла до висновку, що формальдегід є канцерогеном для людини. Саме тому використання термопластичних полімерів, як клею у виробництві фанери, привертає увагу багатьох дослідників. Низка проведених експериментальних досліджень підтверджують можливість використання термопластичних полімерів у виробництві фанери (Goto, Saiki, & Onishi, 1982; Бехта, Кусняк, 2019; Bekhta & Sedliačik, 2019; Bekhta, Müller, & Hunko, 2020; Bekhta et al., 2022a; Bekhta et al., 2020b; Кусняк, 2020; Chang, Guo, & Tang, 2017; Fang et al., 2012, 2013; Han, & Lee, 1997; Song et al., 2016; Smith, Dai, & Ramani, 2002; Lustosa et al., 2015). Проте фанера, склеєна термопластичними полімерами, володіє нижчим водопоглинанням і набряканням за товщиною, порівняно з фанерою, склеєною КФ та ФФ клеями, що обмежує сферу її застосування. До того ж, для термопластичних полімерів властива низька

адгезія до деревини. У цьому випадку склеювання листів шпону відбувається механічним зчепленням шляхом формування клейових замків (Goto et al., 1982; Chang et al., 2017; Fang et al., 2012; Han & Lee, 1997; Smith et al., 2002). Досягнути ефективної адгезії термопласту до деревини доволі важко, оскільки шпон є гідрофільним, а термопластичний полімер – гідрофобним. З цієї причини необхідно знайти спосіб для покращення міжфазного з'єднання двох різних фаз, що дасть змогу покращити властивості фанери. Отже, розуміння механізму зчеплення між термопластичним полімером і шпоном є необхідним для прогнозування та поліпшення властивостей фанери, що розширить сферу її застосування.

Підвищити адгезійну міцність клейового з'єднання можна, діючи на поверхню шпону і полімерної плівки на етапах нанесення клею різними методами (фізичними, механічними та хімічними) (Фабуляк, Іванов, Масленнікова, 2010). Варто зауважити, що поділ на методи досить умовний, оскільки в кожному з них, зазвичай, присутня їхня комплексна дія. Ефективним способом підвищення адгезії термопласту до деревини є хімічне модифікування шпону перед склеюванням фанери (Matuana, Balatinecz, & Park, 1998; Segerholm, Walinder, & Holmberg, 2010; Tang et al., 2011; Fang et al., 2014; Song et al., 2017). Хімічний метод дії на деревинну підкладку є найприйнятнішим, оскільки забезпечує утворення стійких хімічних зв'язків між шпоном і полімером, що дає змогу одержувати матеріал із задовільними фізико-механічними властивостями.

Зацікавлення науковців у напрямі використання термопластичних полімерів у виробництві ДКМ, зокрема фанери, вплинуло на пошук речовин, які покращуватимуть адгезійні властивості деревинно-полімерних матеріалів. Найбільшого застосування для хімічної обробки поверхні шпону отримали наступні модифікувальні речовини: малеїновий ангідрид (Segerholm et al., 2010; Song et al., 2017), полімер модифікований малеїновим ангідридом та хлорований одночасно (Tang et al., 2011), вініл-триметоксилан (силан А-171) (Fang et al., 2014), фталевий ангідрид, малеїновий ангідрид, у-аміно-

пропілтритоксилан, дихлордиетилсилан (Matuana et al., 1998).

Segerholm et al. (2010) досліджували адгезійні властивості між поверхнею деревини (шпоном) та термопластичною плівкою, використовуючи автоматичну систему оцінки зв'язків (ABES). Для склеювання соснового шпону брали поліпропіленові (ПП) плівки та малеїновий ангідридний поліпропілен комерційного виробництва (МАРР). Шпон, склеєний МАРР, показав доволі високі значення міцності на зріз. Крім того, поверхня зламу зразків, склеєних МАРР, показала високу частку руйнування деревини, тоді як зразки з ПП показали високу частку термопластичного руйнування.

Song et al. (2017) хімічно модифікували евкаліптовий шпон малеїновим ангідридом та у-амінопропілтритоксиланом (АРТЕS) і склеювали за допомогою ПП. Результати показали, що фізико-механічні властивості фанери з модифікованого шпону, склеєного ПП, були кращими порівняно зі шпоном, склеєним ФФС. Fang et al. (2014) виготовляли фанеру з листів тополевого шпону, модифікованого розчином вінілтриметоксисилану, який склеювали поліетиленом високої густини (ПЕВГ). Для підтвердження утворення хімічних зв'язків між поверхнею шпону та алкоксиланами використовували інфрачервону спектроскопію (FTIR), х-променеву фотоелектронну спектроскопію (XPS) та визначали кут змочування. Встановлено, що поверхнева обробка шпону алкоксиланами викликає адсорбцію деяких прегідролізованих алкоксиланів, що підвищує міцність фанери на зріз та показники водостійкості. Також автори встановили, що після модифікування поверхні шпону модифікувальними сполуками збільшується кут змочування, а поверхневий натяг, навпаки – зменшується. Tang et al. (2011) для склеювання листів соснового шпону використовували клей (РЕ-sg-МАН) на основі малеїнового ангідриду, прищепленого до ПЕВГ за допомогою штучної сополімеризації. Результати показали, що властивості отриманої фанери з використанням РЕ-sg-МАН з вмістом хлору 1, 3 та 5% відповідають стандарту. Склеюючи листи шпону полівінілхлоридом (ПВХ) Matuana et al. (1998) з'ясували, що поверхнева обробка поверхні шпону такими речовинами як дихлордиетилсилан, фталевий ангідрид і малеїновий поліпропілен є неефективною, оскільки одержані показники міцності аналогічні до результатів необроблених листів шпону.

Впродовж останніх декілька років все більшої уваги багатьох вчених привертає використання лимонної кислоти як клею для деревини (Lee et al., 2020; Fang, Li, & Xu, 2000; Cui et al., 2019). Ефективність використання розчину лимонної кислоти, як клею для склеювання деревини та інших лігноцелюлозних матеріалів, підтверджена результатами багатьох наукових праць. З'ясовано, що розчин лимонної кислоти використовували як клей для формованих виробів на основі деревини (Umamura et al., 2012a; Umamura, Ueda, & Kawai, 2012b),

стружкових плит (Teixeira et al., 2020; Cahyono, & Syahidah, 2019), волокнистих плит (Widyorini et al., 2018; Indrayani et al., 2015), фанери (Sun, Zhao, & Umamura, 2019; Zhao et al., 2019; Chunyin et al., 2022) та LVL бруса (Del Menezzi et al., 2018). Однак дослідження в напрямі склеювання шпону розчином лимонної кислоти у виробництві фанери та LVL бруса, є відносно нечисленними (Sun et al., 2019; Zhao et al., 2019; Chunyin et al., 2022; Del Menezzi et al., 2018). До того ж, склеювання плоских поверхонь, якими є поверхні деревинного шпону, відрізняється від склеювання деревинних частинок у виробництвах стружкових і волокнистих плит. Крім того, жодних досліджень, пов'язаних із застосуванням лимонної кислоти для модифікування шпону у виробництві фанери, склеєної термопластичними плівками, поки що не проводилося. Проте, враховуючи результати досліджень в напрямі використання лимонної кислоти як клею у виробництвах стружкових і волокнистих плит, можна констатувати, що всі досліджувані види ДКМ володіли підвищеною водостійкістю та показниками міцності. Umamura et al. (2012a) припустили, що взаємодія лимонної кислоти з елементами деревини (целюлозою та геміцелюлозами) дає змогу зшивати функціональні групи целюлози та геміцелюлоз з утворенням складноєфірних зв'язків, що призводить до адгезії та добрих зв'язувальних властивостей. Поряд з цим Fang et al. (2000) за допомогою FTIR спектрів довели, що процес реакції зшивання полікарбонОВОЇ кислоти та деревини є реакцією етерифікації, яка проходить через проміжні циклічні ангідриди. Cui et al. (2019) за допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (XPS) оцінювали процес модифікування целюлози розчином лимонної кислоти і, підтвердили наявність С=О груп у прищеплених карбоксильних групах і новоутвореному естері.

Враховуючи екологічність, доступність, вартість лимонної кислоти та властивість до зшивання в клітинних стінках деревини, можна вважати за доцільне використовувати її як модифікувальну речовину для склеювання шпону термопластичними плівками ПЕНГ. Лимонна кислота виступатиме буфером між деревиною та ПЕНГ, карбоксильні групи якої вступатимуть у взаємодію з гідроксильними групами деревини, а також із реакційними групами, що містяться в плівці ПЕНГ, наявність яких доведено в нашій роботі (Кусняк, 2020).

У зв'язку з цим, виникає потреба у подальших дослідженнях щодо хімічного модифікування шпону в технології склеювання фанери термопластичними плівками з метою покращення її властивостей.

Виконані експериментальні дослідження спрямовані на вирішення *актуальної проблеми* – покращення властивостей фанери, склеєної термопластичною плівкою ПЕНГ, що розширить сферу її застосування.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення фанери. *Предмет дослідження* –

закономірності впливу модифікування поверхні шпону на властивості фанери, склеєної термопластичною плівкою.

Мета дослідження – з'ясувати властивості фанери, виготовленої зі шпону, модифікованого лимонною кислотою і склеєного термопластичною плівкою ПЕНГ.

Методи і методика досліджень (Research methods and techniques). Для досягнення мети дослідження використано такі методи: метод плоского пресування – для виготовлення зразків фанери; фізичні методи – для визначення водопоглинання і набрякання фанери за товщиною; механічні – для визначення міцності на зріз, міцності на статичний згин та модуля пружності фанери; метод статистичного аналізу – для оброблення експериментальних даних.

Для проведення досліджень використовували лущений березовий шпон розміром $300 \times 300 \times 1,55$ мм, вологістю $6 \pm 2\%$. Для модифікування шпону використовували лимонну кислоту (у вигляді кристалів, приблизно 99,5% чистоти). Готували водний розчин лимонної кислоти різної концентрації – 5, 15 та 25%. Витрата розчину становила 50, 100 та 150 г/м², а, отже, наважка хімічної речовини складала 4,5; 9,0 та 13,5 г відповідно. Модифіковані листи березового шпону склеювали термопластичною плівкою ПЕНГ завтовшки 100 мкм.

Виготовляли тришарову фанеру розміром $300 \times 300 \times 4,3$ мм. Підготовлений розчин кислоти відповідної концентрації наносили на поверхню шпону із розпилювача шляхом рівномірного розпилення по всій площі поверхні. Лущений шпон обробляли з двох боків для середнього шару, і з одного боку – для верхнього і нижнього шарів фанери. Після нанесення модифікувальної речовини на поверхні листа шпону, здійснювали його сушіння у сушильній шафі за температури 102°C до вологості $6 \pm 2\%$. Термопластичну плівку ПЕНГ розкрояли на формат, що відповідав розмірам лущеного шпону (300×300 мм). Із висушених хімічно модифікованих листів шпону та листів плівки ПЕНГ здійснювали формування пакета. Один лист полімерної плівки того ж розміру, що й лист шпону, укладали між кожними двома сусідніми шарами модифікованого шпону. Пакет шпону формували з урахуванням правил формування, прийнятих у виробництві фанери. Між двома взаємно перпендикулярними листами шпону вкладали одну термопластичну плівку відповідної товщини. Сформований пакет шпону піддавали гарячому пресуванню за таких режимних параметрів: тиск – 1,4 МПа, температура – 160°C, тривалість – 4,5 хв. Після завершення гарячого пресування виконували холодне пресування фанери за $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ впродовж п'яти хвилин. Цю операцію виконували для завершення процесу затвердіння полімеру та зменшення жолоблення фанери.

Після холодного пресування фанеру кондиціювали сім діб за температури $20 \pm 2^\circ\text{C}$ та вологості

$65 \pm 5\%$. Тоді з кожного листа фанери вирізали зразки для визначення наступних властивостей: водопоглинання та набрякання за товщиною після намоочування у воді впродовж 24 год (EN 317, 1993), міцності на зріз (EN 314-1, 2004; EN 314-2, 1993), міцності на згин та модуля пружності (EN 310, 1993).

Для порівняння результатів виготовляли фанеру, склеєну з листів немодифікованого шпону плівкою ПЕНГ та КФ клеєм марки КФ-МТ, який готували за рецептом виробника. Для приготування КФ клею використовували сульфат амонію $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$, каолін і КФ смолу. Фанеру, склеєну з листів немодифікованого шпону плівкою ПЕНГ, виготовляли за тими ж режимними параметрами, що і для фанери, склеєної з листів модифікованого шпону. Фанеру, склеєну КФ-МТ клеєм, виготовляли відповідно до параметрів пресування, які використовують у промислових умовах: тиск – 1,8 МПа, температура – 110°C, тривалість – 6 хв, витрата клею – 110 г/м².

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

Результати (Results). Вплив модифікування шпону лимонною кислотою на низку властивостей фанери було встановлено статистично значущим. Окрім того, концентрація розчину лимонної кислоти суттєво впливала на властивості зразків фанери.

Водопоглинання та набрякання зразків фанери за товщиною. Аналіз ANOVA показав, що концентрація розчину лимонної кислоти значно впливає на водопоглинання зразків фанери ($p = 0,000 < 0,05$), тоді як на набрякання за товщиною не впливає ($p = 0,259 > 0,05$). Витрата розчину кислоти не впливає на водопоглинання і набрякання за товщиною зразків фанери ($p = 0,234 > 0,05$, $p = 0,636 > 0,05$ відповідно). Найпомітніше зменшення показників водопоглинання було зафіксовано для зразків фанери, склеєної зі шпону, модифікованого 15%-ним розчином лимонної кислоти та її витрат від 50 до 150 г/м² (від 38,5 до 39,24%) (табл. 1).

Таблиця 1. Значення водопоглинання фанери
Table 1. Value of water absorption by plywood

Вид клею	Витрата модифікувального розчину, г/м ²	Водопоглинання, %		
		Концентрація модифікувального розчину, %		
		5	15	25
ПЕНГ	50	44,2	38,5	41,54
	100	43,47	38,63	45,07
	150	44,58	39,24	47,61
		46,9		
КФ-МТ		41,07		

Проте для зразків фанери, склеєної із модифікованого шпону 5- та 25%-ним розчином кислоти за її витрати від 50 до 150 г/м², показники водопоглинання дещо вищі (від 41,54 до 47,61%, відповідно). Пояснити таку залежність можна, найімовірніше, тим, що зі збільшенням концентрації розчину кислоти від 5 до 15% збільшується реакційна здатність деревини з лимонною кислотою, що призводить до утворення ефірних зв'язків у клітинах деревини та заповнення їх в'язкотекучим полімером, що тим самим відштовхує вологу з поверхні шпону (Lustosa et al., 2015; Бехта, Кусняк, 2019; Kajaks et al., 2014; Mubarak et al., 2020). За концентрації 25% відбувається надмірне збільшення зшивання клітинних стінок деревини, що сповільнює процес їх заповнення розплавом полімеру (Mubarak et al., 2020; Lee et al., 2020).

Крім того (див. табл. 1), водопоглинання фанери, склеєної зі шпону, модифікованого 15%-ним розчином лимонної кислоти за її витрати 50 г/м², зменшується до 38,5% порівняно з водопоглинанням фанери з немодифікованого шпону, склеєного плівкою ПЕНГ (46,9%) та КФ-МТ клеєм (41,07%), що є позитивним явищем. Пояснення полягає в тому, що під час модифікування шпону розчином лимонної кислоти, утворені гідрофобні етерні групи замінюють деякі функціональні групи деревини, зменшуючи тим самим поглинання води структурою деревини (Vukusic et al., 2006).

За результатами дисперсійного аналізу та наведеними в табл. 2 даними встановлено, що концентрація і витрата модифікувального розчину лимонної кислоти не впливає на показники набрякання фанери за товщиною.

Таблиця 2. Значення набрякання фанери за товщиною

Table 2. Value of thickness swelling of plywood

Вид клею	Витрата модифікувального розчину, г/м ²	Набрякання, %		
		Концентрація модифікувального розчину, %		
		5	15	25
ПЕНГ	50	8,79	8,96	9,07
	100	8,99	8,79	8,61
	150	9,19	7,55	9,06
		9,29		
КФ-МТ		10,33		

Проте модифікування шпону розчином лимонної кислоти дещо зменшує показники набрякання фанери за товщиною, порівняно зі зразками фанери із немодифікованого шпону, склеєного плів-

кою ПЕНГ. Процес модифікування шпону збільшує зшивання клітинних стінок деревини (Lee et al., 2020), що, своєю чергою, покращує проникнення в'язкотекучого полімеру у зшиті стінки деревини. Крім того, показники набрякання зразків фанери з модифікованого та немодифікованого шпону, склеєних плівкою ПЕНГ, є нижчими порівняно із показниками набрякання зразків фанери, склеєної КФ-МТ клеєм. Цей факт вказує на те, що зразки фанери з модифікованого чи немодифікованого шпону, склеєної плівкою ПЕНГ, поглинають воду більше із зовнішніх боків фанери, ніж із торців. Таке явище відбувається внаслідок того, що термопластичний полімер, який проникає в структуру деревини, створює бар'єр для проникнення води по товщині зразка.

Таким чином, модифікування шпону розчином лимонної кислоти зменшує показники водопоглинання та набрякання фанери, що є важливою характеристикою для сфери її застосування. Подібні результати зменшення показників водопоглинання та набрякання було спостережено у дослідженнях з використанням лимонної кислоти як модифікувальної речовини для склеювання стружкових плит (Umamura, Sugihara, & Kawai, 2013), волокнистих плит (Widyorini et al., 2018), LVL бруса (Del Menezzi et al., 2018) та фанери (Sun et al., 2019; Zhao et al., 2019).

Міцність зразків фанери на зріз. Встановлено, що міцність зразків фанери на зріз істотно залежить як від концентрації розчину кислоти, так і від витрати розчину ($p=0,000 \leq 0,05$). До того ж, вплив концентрації розчину був суттєвим ($F=52,468$), ніж вплив обсягу його витрати ($F=9,318$). Всі середні значення міцності зразків фанери на зріз (табл. 3) відповідали вимогам стандарту EN 314-2.

Таблиця 3. Значення міцності фанери на зріз

Table 3. Value of shear strength of plywood

Вид клею	Витрата модифікувального розчину, г/м ²	Міцність на зріз, %		
		Концентрація модифікувального розчину, %		
		5	15	25
ПЕНГ	50	2,11	2,05	1,58
	100	1,76	2,03	1,43
	150	1,74	1,9	1,13
		1,61		
КФ-МТ		2,11		

Найвищі значення міцності спостережено для фанерних зразків зі шпону, модифікованого 5%-ним розчином кислоти за витрати 50 г/м² (2,11 МПа)

і 15%-ним розчином за всіх витрат – 50, 100 і 150 г/м² (2,05, 2,03 і 1,9 МПа відповідно). Найнижчі результати міцності на зріз було зафіксовано для фанерних зразків зі шпону, модифікованого 25%-ним розчином кислоти за всіх витрат (1,13-1,58 МПа). Припускаємо, що чим більша концентрація розчину кислоти (25%), тим більше її карбоксильних груп вступатиме в реакцію естерифікації з гідроксильними групами деревини, що в кінцевому підсумку зменшуватиме кількість карбоксильних груп, які паралельно вступатимуть у реакцію з гідроксильними групами розплаву полімеру ПЕНГ.

Свою чергою, ІЧ-спектроскопією зафіксовано наявність гідроксильних груп у структурі полімеру ПЕНГ, як продуктів деструкції кисневих зв'язуючих містків (внаслідок додавання стабілізаторів на основі складних ефірів під час виготовлення плівки) (Кусняк, 2020). Крім того, зі збільшенням концентрації розчину кислоти зростає реакція естерифікації, а, отже, виділяється більша кількість води як побічного продукту реакції (Mubarok et al., 2020; Lee et al., 2020), що також, вірогідно, перешкоджає взаємодії з в'язкотекучим полімером і в кінцевому підсумку погіршує показники міцності. Відзначено, що лимонна кислота реагує з компонентами деревини, про що свідчить зміна забарвлення шпону до темно-коричневого. Чим більша концентрація розчину кислоти, тим інтенсивніше забарвлення шпону (рис. 1).



Рис. 1. Зразки фанери, склеєної зі шпону, модифікованого розчином лимонної кислоти різної концентрації

Fig. 1. Samples of plywood glued from veneer modified with citric acid solution of different concentration

Таке явище може бути наслідком реакції вуглеводів деревини з лимонною кислотою, а також окисленням складових компонентів деревини, спричинених лимонною кислотою і теплом (Mubarok et al., 2020; Del Menezzi et al., 2018). Згідно даних табл. 3, модифікування шпону 5- та 15%-ним розчином лимонної кислоти підвищує показники міцності фанери на зріз, порівняно із фанерою

з немодифікованого шпону, склеєного плівкою ПЕНГ. Одержані результати також близькі до середніх значень міцності на зріз фанери, склеєної КФ-МТ клеєм.

Міцність зразків фанери на згин та модуль пружності. За результатів аналізу ANOVA можна стверджувати, що витрата розчину лимонної кислоти не впливає на міцність фанери на згин та модуль пружності ($p = 0,518 > 0,05$; $p = 0,989 > 0,05$ відповідно). Найбільший вплив на показники міцності фанери на згин має концентрація розчину лимонної кислоти ($p = 0,000 \leq 0,05$), яка, однак, не впливає на модуль пружності ($p = 0,767 > 0,05$). Середні значення показників міцності на згин найбільші для фанери зі шпону, модифікованого 15%-ним розчином лимонної кислоти витратою 100 г/м² (145,09 МПа), а найменші – за концентрації 25% та витрати в обсязі 150 г/м² (99,9 МПа) (табл. 4).

Таблиця 4. Значення міцності фанери на згин
Table 4. Value of bending strength of plywood

Вид клею	Витрата модифікувального розчину, г/м ²	Міцність на згин, %		
		Концентрація модифікувального розчину, %		
		5	15	25
ПЕНГ	50	130,7	121,38	108,68
	100	98,18	145,09	104,22
	150	117,18	133,32	99,9
		129,11		
КФ-МТ		129,92		

Як у випадку з показниками міцності на зріз, міцність на згин зростає за збільшення концентрації розчину до 15%, а з подальшим збільшенням до 25% – зменшується. Отриманий результат вказує на те, що зростання концентрації розчину кислоти збільшує кількість функціональних груп, які вступають у реакцію естерифікації, що зменшує реакційну здатність з полімером і негативно впливає на кінцевий показник міцності.

Якщо співставити середні значення показників міцності на згин фанерних зразків з немодифікованого шпону, склеєного КФ-МТ клеєм (129,92 МПа) і термопластичною плівкою ПЕНГ (129,11 МПа), то отримаємо практично аналогічні результати. Варто зазначити, що характер залежностей модуля пружності практично подібний до залежностей межі міцності на статичний згин, адже вплив досліджуваних чинників на обидва зазначені показники доволі подібний. Встановлено, що зміна концентрації розчину лимонної кислоти від 5 до 25%

та її витрати від 50 до 150 г/м² не впливає на показники модуля пружності фанери із модифікованого шпону, склеєного плівкою ПЕНГ (табл. 5).

Таблиця 5. Значення модуля пружності фанери
Table 5. Value of the modulus of elasticity of plywood

Вид клею	Витрата модифікувального розчину, г/м ²	Модуль пружності, %		
		Концентрація модифікувального розчину, %		
		5	15	25
ПЕНГ	50	12699,38	10487,8	10728,81
	100	10248,85	12179,44	11314,39
	150	11150,44	11382,09	11284,73
		11661,28		
КФ-МТ		12334,59		

Значення показників модуля пружності фанери з модифікованого шпону, склеєного плівкою ПЕНГ, знаходяться в межах від 10248,85 до 12699,38 МПа,

з немодифікованого шпону, склеєного плівкою ПЕНГ – 11661,28 МПа та з немодифікованого шпону, склеєного КФ-МТ клеєм – 12334,59 МПа. Найвищі середні показники модуля пружності, як і у випадку з показником міцності на зріз, зафіксовані у зразків фанери зі шпону, модифікованого 5%-ним розчином лимонної кислоти з витратою 50 г/м² (12699,38 МПа) (див. табл. 3).

Помічено, що показники модуля пружності фанери з модифікованого та немодифікованого шпону, склеєних плівкою ПЕНГ, дещо нижчі, ніж такі ж показники для фанери, склеєної клеєм КФ-МТ, що є важливим для виготовлення різноманітних гнутих складних конструкцій.

Обговорення (Discussion). Встановлено, що модифікування шпону лимонною кислотою у виробництві фанери, склеєної термопластичною плівкою ПЕНГ, зменшує (покрщує) водопоглинання фанери на 17,91%, набрякання за товщиною – на 18,73%, модуль пружності – на 12,11%, а також збільшує показники міцності на зріз на 31,06 % та міцності на згин – на 12,38%. Крім того, одержані результати міцності фанери на зріз були порівняні з результатами досліджень інших науковців, які у своїх дослідженнях для виготовлення фанери використовували модифікований шпон, склеєний термопластичними полімерами (Fang et al., 2014; Goto et al., 1982; Matuana et al., 1998; Song et al., 2017; Tang et al., 2011) (табл. 6).

Таблиця 6. Міцність на зріз фанери, склеєної з модифікованого шпону і термопластичних полімерів

Table 6. Shear strength of plywood glued from modified veneer and thermoplastic polymers

Вид полімеру	Назва модифікувальної речовини	Межа міцності на зріз, МПа
ПЕВГ (Fang et al., 2014)	вінілтриметоксисилан (силан А-171)	1,18
	у-амінопропілтриоксисилан А-1100	3,9
ПВХ (Matuana et al., 1998)	дихлордиетилсилан	2,1
	фталевий ангідрид	2,3
	малеїновий поліпропілен	2,0
ПП (Song et al., 2017)	малеїновий ангідрид	1,8
	у-амінопропілтриоксисилан	1,7
ПЕВГ (Tang et al., 2011)	малеїновий ангідрид з одночасним хлоруванням	1,17
ПЕНГ (це дослідження)	лимонна кислота	1,74-2,11

Таке порівняння показало, що фізико-механічні властивості фанери залежать від виду термопластичної плівки, яку використовують для склеювання листів шпону і модифікувальної речовини для поверхневої обробки шпону. За результатами досліджень (табл. 6) можна стверджувати, що всі зразки фанери, склеєної з модифікованого шпону різними термопластичними плівками, за показником міцності на зріз відповідають стандарту ДСТУ

EN 314-2 (1993). Також з'ясовано, що для фанери зі шпону, модифікованого розчином лимонної кислоти і склеєного термопластичною плівкою ПЕНГ, характерна найнижча адсорбція води (див. табл. 1). Варто також зазначити, що використання лимонної кислоти, як модифікувальної речовини для поверхневої обробки шпону у виробництві фанери, порівняно з іншими речовинами (вінілтриметоксисилан (Fang et al., 2014), фталевий ангідрид, малеїно-

вий ангідрид, у-амінопропілтретоксилан, дихлордиетилсилан (Matuana et al., 1998), малеїновий ангідрид (Song et al., 2017), полімер модифікований малеїновим ангідридом та хлорований одночасно (Tang et al., 2011)), є більш економічно та екологічно вигідним.

У підсумку можна зазначити, що результати досліджень підтверджують доцільність модифікування березового шпону розчином лимонної кислоти у виробництві фанери, виготовленої з використанням, як клею, термопластичної плівки ПЕНГ, що покращить її фізико-механічні властивості.

Висновки (Conclusions). Модифікування березового шпону розчином лимонної кислоти у виробництві фанери, склеєної термопластичною плівкою ПЕНГ, є необхідним з погляду покращення міжфазного з'єднання між термопластичним полімером і шпоном, що дасть змогу розширити сферу її застосування.

Для фанери зі шпону, модифікованого 15%-ним розчином лимонної кислоти і склеєного термопластичною плівкою ПЕНГ, характерною ознакою була найнижча адсорбція води (38,5-39,24%). За досліджуваних значень змінних факторів показники набрякання фанери з модифікованого шпону, склеєного плівкою ПЕНГ, є на 1,1-18,73% меншими, ніж для фанери з немодифікованого шпону, склеєного плівкою ПЕНГ, і на 11,04-26,91% меншими ніж для фанери, склеєної КФ-МТ клеєм.

Зразки фанери з модифікованого шпону, склеєного плівкою ПЕНГ, відповідають за показниками міцності на зріз вимогам стандарту ДСТУ EN 314-2. До того ж, модифікування шпону розчином кислоти збільшує міцність фанери на зріз до 2,11 МПа, що суттєво, порівняно зі зразками фанери з немодифікованого шпону (1,61 МПа).

Модифікування шпону розчином кислоти концентрацією 25% зменшує показники міцності на зріз до значення 1,13 МПа. Найбільші середні значення показників міцності на згин встановлено для фанери, виготовленої зі шпону, модифікованого 15%-ним розчином лимонної кислоти та витратою 100 г/м² (145,09 МПа), а найменші – за концентрації 25% та витрати 150 г/м² (99,9 МПа). Той факт, що показники модуля пружності доволі подібні вказує на те, що концентрація та витрата модифікувальної речовини на цей показник не впливають. Модуль пружності фанери з немодифікованого шпону, склеєного плівкою ПЕНГ, дещо нижчий (11661,27 МПа), ніж для фанери шпону, склеєного традиційним клеєм КФ-МТ (12334,59 МПа).

Модифікування поверхні березового шпону у виробництві фанери з використанням, як клею, термопластичної плівки покращує сумісність різнополярних матеріалів. Врахуючи вартість, доступність та екологічність лимонної кислоти, запропонований спосіб поверхневої обробки шпону є доцільним і перспективним, що в кінцевому підсумку розширить сфери застосування фанери.

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). Розроблення режимів склеювання шпону з використанням термопластичних полімерів: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.06. Львів, Національний лісотехнічний університет України [Kusniak, I.I. (2020). *Development of veneer gluing modes using thermoplastic polymers* (Doctoral dissertation, Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine). Retrieved from https://drive.google.com/file/d/1wOguYEaspXuwILF4y-F3swN_HiLSKCoa/view.] (in Ukrainian)
- Фабуляк, Ф. Г., Іванов, С. В., Масленнікова, Л. Д. (2010). *Хімія і технологія олигомерів*: підручник. Київ: Книжкове вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк» [Fabulyak, F.G., Ivanov, S.V., & Maslennikova, L.D. (2010). *Chemistry and technology of oligomers*. Kyiv: National Book Publishing House Aviation University "NAU-Druk"] (in Ukrainian)
- Bekhta, P., Chernetskyi, O., Kusniak, I., Bekhta, N., & Bryn, O. (2022a). 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., 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. <https://doi.org/10.3390/polym12112582>
- Bekhta, P., Pizzi, A., Kusniak, I., Bekhta, N., Chernetskyi, O., & Nuryawan, A.A. (2022b). Comparative Study of Several Properties of Plywood Bonded with Virgin and Recycled LDPE Films. *Materials*, 15, 4942. <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>
- Cahyono, T., & Syahidah, F. (2019). Citric acid, an environmentally friendly adhesive and wood impregnation material-review of research. *Materials Science and Engineering*, 593: 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/593/1/012009>
- 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>
- Chunyun, L. I., Hong, L.E. I., Zhigang, W.U., Xuedong, X.I., Guanben, D.U., & Pizzi, A. (2022). A fully bio-based adhesive from glucose and citric acid for plywood with high-performance. *ACS Appl.*

- Mater. Interfaces*, 14(20), 23859-23867. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c02859>
- Cui, X., Honda, T., Asoh, T.-Aki, & Uyama, H. (2019). Cellulose Modified by Citric Acid Reinforced Polypropylene Resin as Fillers. *Carbohydrate Polymers*, 230(2): 115662. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115662>
- Del Menezzi, C., Amirou, S., Pizzi, A., Xi, X., & Delmotte, L. (2018). Reactions with wood carbohydrates and lignin of citric acid as a bond promoter of wood veneer panels. *Polymers*, 10, 833. <https://doi.org/10.3390/polym10080833>
- 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, 1993. 14 p.
- EN 314-1 (2004). Plywood – Bonding Quality – Part 1: Test Methods. [Published 2006-01-16]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization, 2004. 24 p.
- EN 314-2 (1993). Plywood – Bonding Quality – Part 2: Requirements. [Published 1993-15-04]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization, 1993. 12 p.
- EN 317 (1993). Particleboards and Fibreboards. Determination of Swelling in Thickness after Immersion in Water. [Published 1993-31-05]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization, 1993. 12 p.
- FAO (2020). Yearbook of Forest Products 2022. Retrieved from <https://www.fao.org/3/cc3475m/cc3475m.pdf>
- 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>
- Fang, L., Chang, L., Guo, W., Chen, Y., & Wang, Z. (2014). Influence of silane surface modification of veneer on interfacial adhesion of wood-plastic plywood. *Applied Surface Science*, 288, 682-689. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.10.098>
- Fang, G., Li, J., & Xu, X. (2000). The intermediate of crosslinking reaction between wood and polycarboxylic acid. *Scientia Silvae Sinicae*, 36(4), 51-54. <https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.20000410> (in Korean)
- Goto, T., Saiki, H., & Onishi, H. (1982). Studies on wood gluing. XIII: Gluability and scanning electron microscopic study of wood-polypropylene bonding. *Wood Science and Technology*, 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://koreascience.kr/article/JAKO199700238220498.pdf> (in Korean)
- Indrayani, Y., Setyawati, D., Munawar, S. S., Umemura, K., & Yoshimura, T. (2015). Evaluation of termite resistance of medium density fiberboard (MDF) manufacture from agricultural fiber bonded with citric acid. *Procedia Environ. Science*, 28, 778-782. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.091>
- 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>
- Kanazawa, A., Saito, I., Araki, A., Takeda, M., Ma, M., Saijo, Y., & Kishi, R. (2010). Association between indoor exposure to semi-volatile organic compounds and building-related symptoms among the occupants of residential dwellings. *Indoor Air*, 20(1), 72-84. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00629.x>
- Lee, S. H., Md Tahir, P., Lum, W. C., Tan, L. P., Bawon, P., Park, B.-D., Osman Al Edrus, S. S., & Abdullah, U. H. A. (2020). Review on Citric Acid as Green Modifying Agent and Binder for Wood. *Polymers*, 12(8), 1692. <https://doi.org/10.3390/polym12081692>
- Lustosa, E. C. B., Del Menezzi, C. H. S., & 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. <https://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.010615>
- Matuana, L. M., Balatinecz, J. J., & Park, C. B. (1998). Effect of surface properties on the adhesion between PVC and wood veneer laminates. *Polymer Engineering and Science*, 38(5), 765-773. <https://doi.org/10.1002/pen.10242>
- Mubarok, M., Militz, H., Dumarçay, S., & Gérardin, P. (2020). Beech wood modification based on in situ esterification with sorbitol and citric acid. *Wood Sci. Technol.*, 54, 479-502. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01172-7>
- Segerholm, B. K., Walinder, M. P., & Holmberg, D. (2010). Adhesion studies of scots pine-polypropylene bond using ABES. *Proceedings of the 6th meeting of the Nordic-Baltic Network in Wood Material Science and Engineering (WSE)*. Tallinn, Estonia, 142-146. Retrieved from https://nordicforestresearch.org/wp-content/uploads/2017/07/2010_report_wse.pdf
- 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>
- Sun, S., Zhao, Z., & Umemura, K. (2019). Further exploration of sucrose-citric acid adhesive: Synthesis and application on plywood. *Polymers*, 11, 1875. <https://doi.org/10.3390/polym11111875>
- Tang, L., Zhao-gang, Z., Jiao, Q., Ji-ruo, Z., & Ying, F. (2011). The preparation and application of a new formaldehyde-free adhesive for plywood. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31(6), 507-512. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.04.005>
- Teixeira, D., Pereira, D., Nakamura, A., & Brum, S. (2020). Adhesivity of bio-based anhydrous citric acid, tannin-citric acid and ricinoleic acid in the properties of formaldehyde-free medium density particleboard (MDP). *Drvna industrija*, 71(3), 235-242. <https://doi.org/10.5552/drvid.2020.1917>
- Umemura, K., Sugihara, O., & Kawai, S. (2013). Investigation of a new natural adhesive composed of citric acid and sucrose for particleboard. *Journal of Wood Science*, 59, 203-208. <https://doi.org/10.1007/s10086-013-1326-6>
- Umemura, K., Ueda, T., Munawar, S. S., & Kawai, S. (2012a). Application of citric acid as natural adhesive for wood. *Journal of Applied Polymer Science*, 123, 1991-1996. <https://doi.org/10.1002/app.34708>
- Umemura, K., Ueda, T., & Kawai, S. (2012b). Characterization of wood-based molding bonded with citric acid. *Journal of Wood Science*, 58, 38-45. <https://doi.org/10.1007/s10086-011-1214-x>
- Vukusic, S. B., Katovic, D., Schramm, C., Trajkovic, J., & Sefc, B. (2006). Polycarboxylic acids as non-formaldehyde anti-swelling agents for wood. *Holzforschung*, 60, 439-444. <https://doi.org/10.1515/HF.2006.069>
- Widyorini, R., Dewi, G. K., Nugroho, W. D., Prayitno, T. A., Jati, A. S., & Tejolaksono, M. N. (2018). Properties of citric acid-bonded composite board from elephant dung fibers. *Journal of The Korean Wood Science and Technology*, 46, 132-142. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2018.46.2.132>
- 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
- Zhao, Z., Sakai, S., Wu, D., Chen, Z., Zhu, N., Huang, C., Sun, S., Zhang, M., Umemura, K., & Yong, Q. (2019). Further exploration of sucrose – Citric acid adhesive: Investigation of optimal hot-pressing conditions for plywood and curing behavior. *Polymers*, 11, 1996. <https://doi.org/10.3390/polym11121996>

The influence of veneer modification on the properties of plywood glued with thermoplastic LDPE film

P. Bekhta¹, I. Kusniak², O. Chernetskyi³, N. Bekhta⁴, R. Kozak⁵, O. Bryn⁶, M. Kopansky⁷

Plywood glued with thermoplastic films is a promising material in furniture production. After all, the replacement of liquid thermosetting adhesives with dry thermoplastic films in the technological process of plywood production not only provides a change in the emission class, but also improves production conditions. That is why the production of plywood glued with thermoplastic films is becoming increasingly important today.

However, the wood composites glued with thermoplastic films have low water resistance compared to the thermoreactive adhesives. In addition, low adhesion to wood is characteristic for thermoplastic polymers. In this paper, a modification of veneer in the production of plywood glued with thermoplastic film of low density polyethylene (LDPE) is proposed. The main objective of this study was to investigate an effect

- 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.: 032-238-44-99. E-mail: bekhta@ukr.net ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4320-5247>
- ² Iryna Kusniak – PhD of 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: Lokiorest@gmail.com
- ⁴ Nataliya Bekhta – Senior lecturer at 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>
- ⁵ Ruslan Kozak – Doctor of Technical Sciences, Professor 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: kozak_r@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1297-9810>
- ⁶ Olesya Bryn – PhD of Technical Sciences, Associate professor (Docent) 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: chuppylo_olesya@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9324-8093>
- ⁷ Mykola Kopansky – PhD of Technical Sciences, Associate professor 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: m_kopansky@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3897-4818>

of veneer modification on the properties of plywood glued with LDPE film. Citric acid as a modifying substance in concentrations of 5, 15, and 25% and thermoplastic LDPE film with a thickness of 100 μm were used in the experiments. The dosage of acid solution was 50, 100 and 150 g/m^2 . To compare the results, the plywood from unmodified veneer glued with a LDPE film and urea-formaldehyde adhesive (UF) was made.

The results of this study showed that modification of veneer has a positive effect on the properties of plywood. It was found that water absorption and thickness swelling of plywood improve, while shear and bending strength increase. It was also found that the concentration of the citric acid solution significantly affects the properties of plywood, while the dosage of the citric acid solution does not.

It was found that plywood made from veneer modified with a 15% solution of citric acid and glued with a LDPE film has the lowest water adsorption (38,5-39,24%). Plywood samples made from modified veneer glued with LDPE film met the requirements of the DSTU EN 314-2 in terms of shear strength. Modification of the veneer with an acid solution increased the shear strength of plywood to 2,11 MPa. It was noted that the modulus of elasticity of plywood made from

modified and unmodified veneers bonded with LDPE film is somewhat lower than that of plywood bonded with UF adhesive, which is important for the manufacture of various bent complex structures.

It was found that the surface treatment of birch veneer by citric acid in the production of plywood bonded with LDPE thermoplastic film improves the compatibility between differently polar materials, such as hydrophilic wood and hydrophobic thermoplastic polymer. This leads to improved bonding quality of veneer. The use of high concentrations and dosage of citric acid for surface treatment of birch veneer changes its color, which also indicates the possibility of chemical reactions between wood and citric acid compounds.

Modification of veneer with citric acid in the production of plywood glued with a LDPE film has a great potential due to its environmental friendliness, availability, cost and ability to improve the properties of plywood, which is important for maintaining high operational characteristics of products.

Key words: plywood; rotary-cut veneer; veneer modification; citric acid; thermoplastic film; water absorption; thickness swelling; shear strength; bending strength; modulus of elasticity.