ДЕРЕВООБРОБНІ ТА МЕБЛЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 684.4 04

<http://dx.doi.org/10.31548/forest2019.02.103>

ВПЛИВ СТАРІННЯ ПОЛІМЕРНОГО В'ЯЖУЧОГО НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ДЕРЕВИННОВОЛОКНИСТИХ ПЛИТ

О. О. Пінчевська, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри технологій та дизайну виробів з деревини,
Національний університет біоресурсів та природокористування України
О. В. Заворотнюк, провідний конструктор,
ТОВ «НІТ ГРУП»
E-mail: olenapinchevska@nubip.edu.ua

Процес проектування виробів із деревинноволокнистих плит, а саме плит MDF, вирізняється складністю через високу неоднорідність розподілу компонентів за об'ємом, що впливає на механічні властивості матеріалу. На сьогодні плити MDF використовують як робочі поверхні у кухонних гарнітурах, у меблях для ванних кімнат. Оскільки дедалі більшого поширення набувають конструкційні рішення із використанням тонких стільниць, необхідним є встановлення терміну служби робочих поверхонь різної товщини за експлуатації у кухонних приміщеннях і ванних кімнатах.

Враховуючи кліматичні умови експлуатації стільниць, що впливають на довговічність, прогнозування якої базується на кінетичній теорії міцності, необхідним є визначення залежності стану в'язучого, що застосовується у виготовленні плит MDF, від температури та тривалості її дії. З цією метою запропоновано у формулу розрахунку довговічності ввести коефіцієнт деструкції смоли, залежність якого від згаданих параметрів встановлено експериментальним шляхом.

Коефіцієнт деструкції смоли визначено за втратою її маси під час впливу температури у діапазоні 20–90 °C упродовж 0,08–5 год. Отримано адекватне за критерієм Фішера рівняння регресії, аналіз якого дав змогу визначити негативний сильний вплив обох факторів на деструкцію в'язучого.

Розрахунок теоретичної довговічності проведено за імітаційного навантаження плит MDF товщиною 10, 16 і 19 мм за різних за тривалістю кліматичних умов експлуатації. Для цього проведено розрахунки внутрішніх напружень, що виникають за рівномірного навантаження кухонної стільниці

предметами вагою 20 кг за допомогою методу кінцевих елементів, реалізованого у програмі SolidWorks.

Визначено, що отримані результати теоретичної довговічності кухонних стільниць з урахуванням старіння полімерного в'язучого близькі до рекомендованих термінів експлуатації кухонних меблів, що становлять у середньому 15–20 років.

Ключові слова: плити MDF, кухонні стільниці, деструкція смоли, працездатність.

Актуальність. За обсягами виробництва деревні композити посідають одне з основних місць у світовій економіці. Вони охоплюють велику кількість різних матеріалів, що відрізняються властивостями та технологіями виробництва. Цьому сприяють низька вартість деревних відходів, їхні цінні та унікальні властивості, поновлюваність деревних ресурсів.

Номенклатура плит, які виготовляють із подрібненої деревини на полімерному в'язучому, охоплює: деревинноволокнисті плити сухого та мокрого способу виробництва; деревинноволокнисті плити середньої щільності (плити MDF – medium-

density fibreboard); стружкові плити та oriented strand board (плити OSB). Сьогодні плити MDF є популярними на ринку, оскільки мають найменший вміст синтетичного в'язучого. За даними Alto Consulting Group, світовий попит на плити MDF збільшився упродовж 2015–2017 рр. на 15,7 %. Значна частка виробничих потужностей припадає на Європу, де найбільшими виробниками є заводи промислових груп «Kronospan», «Egger» та «Swiss Krono» («Market of fiberboard (fiberboard). Current situation and forecast for 2018–2022», 2018).

Як свідчать дослідження європейського ринку («The world market of

Рис. 1. Динаміка зростання використання плит MDF у виготовленні корпусних меблів

MDF», 2016), існує тенденція до використання плит MDF замість ламінованих стружкових плит у виготовленні корпусних меблів. Виробники корпусних виробів дедалі більше починають застосовувати плити MDF під час проектування та виробництва меблів для дитячих кімнат, віталень і кухонних наборів. Порівняно із 2012 р. відсоток використання плит MDF значно зріс минулого року і становив 32 % (рис. 1).

Проектування виробів із деревних плитних матеріалів має певні складнощі через високу неоднорідність розподілу компонентів за об'ємом. Сьогодні під час проектування меблевих конструкцій використовують емпіричний метод граничних станів, а всі ускладнення враховують поправками або коефіцієнтами. Це сприяє багаторазовому запасу міцності та збільшенню ефективного об'єму матеріалу, що впливає на собівартість готової продукції.

Останнім часом спостерігається збільшення частки використання плит MDF у конструкціях кухонних гарнітурів. Їх застосовують як елементи

корпусу тумб – видимі вертикальні та горизонтальні складальні одиниці, елементи декору. За бажанням споживача увесь виріб може бути виготовлений із цих плит. Сьогодні популярним є виготовлення кухонних стільниць із плит MDF, причому в дизайні меблів для кухні щораз більше застосовують тонкі стільниці («Microtrends: Why does your kitchen have a very thin tabletop», 2018) (рис. 2).

Кухонні меблі експлуатують у несприятливих температурно-вологісних умовах навколишнього середовища, а дія механічного навантаження може призвести до утворення тріщин, прогину стільниці та її руйнування. Ці дефекти утворюються та розвиваються під час експлуатації за підвищеної вологості повітря у приміщенні та високої температури у зоні варильної поверхні, що призводить до втрати міцності через дію багатьох чинників, одним з яких є старіння в'язучого.

Тому актуальним є прогнозування терміну працездатності виробів

Рис. 2. Набір меблів для кухні із стільницею завтовшки 16 мм, опорядженою фарбою

із плит MDF різного гатунку з урахуванням сукупного впливу різноманітних факторів на конструкцію у процесі експлуатації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останнім часом дослідження впливу різних чинників на механічні властивості плит MDF зосереджувалися на особливостях впливу підвищених температур (Charles, 2009; Bekhta & Marutzky, 2007); гідротермальної модифікації волокон на деякі фізико-механічні показники плит MDF (Mohebbi et al., 2008); міцності плит за різних температур і вологості матеріалу (Yu DeXin & Birgit, 1983; Shi & Gardner, 2006); зміни параметрів навоколишнього середовища та стійкості проти дії вогню (Bekhta et al., 2003; Sinha et al., 2011). Встановлено, що міцність на згин і модуль пружності плит MDF погіршується із підвищенням температури під час випробуванням (Kojima & Suzuki, 2011).

Руйнування, яке виникає під впливом зовнішніх чинників (температури, УФ-радіації, вологості та ін.) та механічного навантаження, є процесом, що триває в часі й пов'язаний із накопиченням дефектів у структурі матеріалу. Усі ці фактори впливають на меблі кухонного набору, особливо на робочу поверхню (стілницю). Процес експлуатації стільниці тісно пов'язаний із впливом температури, який може бути як коротко-, так і довготривалим у зоні приготування їжі, вологості у зоні миття посуду та механічного навантаження, яке виникає у зв'язку з появою отворів під варильну поверхню та мийку, які своєю чергою виконують роль концентраторів напруження.

Для проектування будь-якого виробу необхідно мати відомості про довговічність матеріалу, з якого він зроблений. У багатьох випадках

експериментальне визначення працездатності виробу є неможливим, оскільки потребує багаторічного спостереження. Тому розраховують теоретичну довговічність, що дає можливість прогнозувати термін збереження працездатного стану. Найефективніші результати у цьому напрямі отримані Hrabar (2002), Hrabar et al. (2008), які базуються на використанні основних положень кінетичної теорії міцності твердих тіл. Проте вони не враховують особливості впливу кліматичних параметрів на зміну стану в'язучого композиційних матеріалів.

Мета дослідження: оцінювання довговічності плит MDF шляхом прогнозування їх терміну експлуатації у кухонних приміщеннях, що базується на кінетичній теорії міцності та враховує вплив умов експлуатації, що впливають на деструкцію в'язучого.

Матеріали і методи дослідження. Теоретичну довговічність будь-якого матеріалу можна розрахувати за формулою (1) (Kulman & Boiko, 2017), враховуючи напруження, температуру експлуатації та вологість матеріалу:

$$\tau = \tau_m \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{R} (T^{-1} - T_m^{-1}) \right] \exp \left(\alpha \frac{W}{W_m} \right), \quad (1)$$

де τ_m , U_0 , γ і T_m – термоактиваційні параметри матеріалу: τ_m – мінімальна довговічність (період коливання кінетичних одиниць – атомів, груп атомів, сегментів), с; U_0 – максимальна енергія активації руйнування, кДж/моль; γ – структурно-механічний параметр, кДж/(моль·МПа); T_m – гранична температура існування твердого тіла (температура деструкції), К; R – універсальна газова стала, кДж/(моль·К); τ – час до руйнування (довговічність), с; σ – напруження матеріалу при його експлуатації, МПа; T – поточна температура матеріалу при його експлуатації, К.

тації, K ; α – коефіцієнт, що враховує вплив вологості матеріалу на довговічність; W_m – гранично допустима вологість матеріалу, за якої він має достатню для експлуатації міцність, %; W – поточна вологість матеріалу під час його експлуатації, %.

Однак за такого підходу зовсім не враховують тривалий вплив факторів навколишнього середовища, що спричиняють старіння матеріалів, і тому прогнозування буде досить приблизним.

Було висунуто гіпотезу, що реальну довговічність плит MDF, які зазнають у процесі експлуатації тривалого впливу підвищеної температури, можна визначити за допомогою поправки на природне старіння полімерного в'язучого. Запропоновано рівняння довговічності (2) із введенням коефіцієнта β , що враховує деструкцію полімерного в'язучого:

$$\tau = \tau_m \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{R} (T^{-1} - T_m^{-1}) \right] \exp \left(\alpha \beta \frac{W}{W_m} \right), \quad (2)$$

Для отримання кількісного значення величини коефіцієнта β , що враховує вплив старіння, необхідно взяти до уваги параметри середовища, у якому експлуатують матеріал.

Накопичений до цього часу експериментальний матеріал і його аналіз дали змогу виявити, що найбільший вплив на старіння полімерної матриці чинить температура та час її дії (Mamontov, 2012). Тому їх було обрано як основні фактори, що впливають на старіння полімерного в'язучого плит MDF. Для дослідження обрано карбамідо-формальдегідну смолу марки КФ-МТ, густина якої становить 1275 кг/м^3 , концентрація робочого розчину 50 %, в'язкість за віскозиметром ВЗ-4 дорівнює 15 с. Смола КФ-МТ використовують для проклеювання

деревної маси при виготовленні плит MDF на підприємстві ПРАТ «Коростенський завод МДФ», зразки плит із якого були обрані для досліджень.

Спостереження за роботою у кухонних приміщеннях житлових будинків дали змогу встановити, що тривалість впливу температури на кухонну стільницю перебуває у межах від 5 хвилин до 5 годин. Тому діапазон тривалості впливу температури на смолу вибрано в межах 0,08–5 годин. Максимальну температуру впливу 90°C обрано як таку, що відповідає температурі склування смоли, яка перебуває у межах $90\text{--}110^\circ\text{C}$.

Результати дослідження та їх обговорення. Коефіцієнт деструкції смоли визначали за втратою маси під час впливу температури на пластинку із смолою, яку зважували на електронних вагах «Axis-500» із точністю $0,01 \text{ г}$ (рис. 3). Одну партію зразків смоли витримували протягом $\tau_1 = 5 \text{ хв}$ і $\tau_2 = 5 \text{ год}$ за температури $t_1 = 20^\circ\text{C}$, а інші зразки із смолою поміщали у лабораторну сушильну шафу (рис. 4), де їх витримували за температури $t_2 = 90^\circ\text{C}$. Температуру у сушильній шафі контролювали за допомогою термометри.

Після витримки у камері упродовж заданого часу ($\tau_1 = 5 \text{ хв}$ і $\tau_2 = 5 \text{ год}$) зразки зважували на електронних вагах. Результати оцінювали за втратою маси зразка після певного часу дії температури (рис. 5).

Дія високої температури ($t = 90^\circ\text{C}$) упродовж тривалого проміжку часу ($\tau = 5 \text{ год}$) спричинила значне зменшення значення показника маси в'язучого від $7,96 \text{ г}$ до $5,35 \text{ г}$ (рис. 5). За інших значень факторів впливу маса смоли змінилася незначно, а за $\tau = 5 \text{ хв}$ і $t = 20^\circ\text{C}$ не змінилася взагалі. Короткочасна дія підвищеної температури не чинить значного впливу на деструкцію

Рис. 3. Зразок смоли КФ-МТ під час процедури зважування початкової маси

Рис. 4. Розміщення зразків зі смолою у сушильний шафі

смоли, як і вплив кімнатної температури за будь-якого часу впливу.

Статистичне оброблення експериментальних даних дало змогу отримати адекватні за критерієм Фішера (таблиця) рівняння регресії, які мають вигляд:

$$y = 7,06 - 0,7 \cdot x_1 - 0,61 \cdot x_2 - 0,40 \cdot x_1 \cdot x_2; \quad (3)$$

у нормалізованих позначеннях

$$y = 8,14 - 0,0082 \cdot t - 0,0049 \cdot \tau - 0,005 \cdot t \cdot \tau, \quad (4)$$

у натуральних позначеннях

де t – температура, $^{\circ}\text{C}$, τ – час дії температури, год

Видно, що обидва фактори та їх взаємодія чинять сильний негативний вплив на деструкцію смоли. Перевірка рівнянь підтвердила адекватність моделі на рівні значущості 5 %, всі коефіцієнти рівняння є значущими.

Для перевірки висунутої гіпотези необхідно розрахувати теоретичну довговічність плит MDF різної товщини з урахуванням коефіцієнта β . Щоб визначитися із кількісними значеннями параметрів рівняння (2), а саме величиною внутрішніх напружень, що виникають у процесі експерименту,

Рис. 5. Зміна значення показника маси смоли залежно від температури та часу її дії

Результати перевірки адекватності моделі показника втрати маси смоли залежно від температури

Показник	F-критерій Фішера	
	$F_{\text{розрах}}^{\text{розр}}$	$F_{\text{табл}}$
Втрата маси смоли	2,22	6,04

плуатації кухонної стільниці, було проведено розрахунок із використанням методу кінцевих елементів.

Кухонна стільниця жорстко закріплена з обох кінців. Ця конструкція працює на поперечний згин і перебуває під дією ваги предметів, які на ній розташовані. Кріплення з обох кінців ідентичні, тому під час моделювання використано принцип симетрії. Для розрахунку прийнято, що загальна вага побутових предметів на стільниці становить 20 кг і розподілена рівномірно. Критерієм міцності конструкції є величина внутрішніх напружень, які виникають при дії навантаження та прогину матеріалу, з якого виготовлено виріб.

На рис. 6 наведено сітку кінцевих елементів, побудовану в середовищі програми «SolidWorks Simulations».

На основі проведених розрахунків встановлено значення еквівалентного

напруження. Величина максимального напруження – 5,81 МПа (рис. 7). Враховуючи, що межа міцності плити MDF на згин сягає 20 МПа, можна стверджувати, що матеріал має значний запас міцності.

Ще одним критерієм міцності кухонної стільниці є величина її прогину, тому фрагмент закріпленої стільниці було перевірено на деформацію за допомогою комп'ютерного моделювання у системі «SolidWorks Simulations» (рис. 8).

За значень внутрішніх напружень 5,81 МПа, величина деформації виявилася незначною – 2,52 мм, тобто у межах допустимих значень.

Отже, для проведення розрахунків прийнято такі значення параметрів: навантаження на плиту – 20 кг,

Рис. 6. Сітка кінцевих елементів для кухонної стільниці

Рис. 7. Епюра внутрішніх напружень у досліджуваному фрагменті під час застосування рівномірно розподіленого навантаження

Рис. 8. Епюра переміщення фрагмента стільниці під час застосування рівномірно розподіленого навантаження

що спричиняє внутрішні напруження у матеріалі $\sigma = 5,81$ МПа, температура $t = 20^\circ\text{C}$ або $T = 293$ К, сумарний час впливу температури та вологості на кухонні меблі – 100 діб. Результат розрахунку за формулами (1) і (2) наведено на рис. 9.

Видно, що довговічність матеріалу зменшилася майже удвічі порівняно з довговічністю, розрахованою без урахування впливу деструкції в'язучого. Довговічність плити MDF

завтовшки 19 мм виявилася меншою на 16 % порівняно з довговічністю плити товщиною 16 мм. Це очевидно пов'язано з тим, що щільність плити завтовшки 19 мм була меншою, ніж щільність плити товщиною 16 мм, оскільки вплив щільності на довговічність є дуже суттєвим (Kulman et al., 2015; Boiko & Ancyferova, 2015).

Отримані результати довговічності кухонних стільниць відповідають рекомендованим термінам експлуатації кухонних меблів, що становлять у середньому 15–20 років («The average service life of high-quality furniture», 2017).

Висновки і перспективи. Визначено збільшення обсягу використання плит MDF для виготовлення кухонних меблів, що потребує врахування під час проектування виробу впливу параметрів середовища експлуатації на його довговічність.

Аналіз попередніх досліджень дав змогу визначити, що з відомих методів найбільш достовірні значення довговічності матеріалів можливо отримати за допомогою кінетичної теорії міцності твердих тіл, що ґрунтована на термоактиваційному механізмі руйнування. Однак такий

Рис. 9. Зіставлення розрахованих показників довговічності

метод розрахунку не враховує вплив деструкції смоли під час підвищення температури експлуатації, наприклад у зоні контакту нагрівальних приладів та кухонної стільниці.

Запропоновано розраховувати теоретичну довговічність плит MDF за допомогою скорегованого рівняння Ратнера–Ярцева, що базується на основних положеннях кінетичної теорії міцності, шляхом введення коефіцієнта, який враховує вплив кліматичних параметрів на старіння полімерного в'язучого.

Отримано адекватні рівняння регресії для визначення коефіцієнта впливу старіння карбамідоформальдегідної смоли КФ-МТ у разі дії короткочасного та довготривалого температурного навантаження.

Визначено, що врахування зміни стану в'язучого знижує довговічність виробу і дає змогу отримати результати, які відповідають реальному терміну експлуатації. Враховуючи те, що для проведених досліджень було використано плити MDF без покриття, наступним етапом буде визначення їхньої довговічності з різними видами покриттів.

Список літератури

- Bekhta, P., & Marutzky, R. (2007). Bending strength and modulus of elasticity of particleboards at various temperatures. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 65, 163–165.
- Bekhta, P., Lecka, J., & Morze, Z. (2003). Short-term effect of the temperature on the bending strength of wood-based panels. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61 (6), 423–424.
- Boiko, L. M., & Antsyferova, O. V. (2015). Effect of density on the strength of wood-fiber boards of average density at temperature change. *Scientific Bulletin of NFWU of Ukraine*, 25 (10), 221–225 (in Ukrainian).
- Charles, R. F. (2009). Adhesive groups and how they relate to the durability of bonded wood. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23, 601–617.
- Hrabar, I. H. (2002). Thermoactivation analysis and synergy of fracture. *Zytomir* (in Ukrainian).
- Hrabar, I. H., Boiko, L. M., & Kulman, S. M. (2008). Design and method of forecasting the resource and critical strength of cabinet furniture. *Scientific Bulletin of NFWU of Ukraine*, 18 (10), 81–89 (in Ukrainian).
- Kojima, Y., & Suzuki, S. (2011). Evaluating the durability of wood-based panels using internal bond strength results from accelerated aging treatments. *Journal of Wood Science*, 57 (1), 7–13.
- Kulman S., Boiko, L., & Antsyferova, O. (2015). Bending strength (modulus of rupture) and modulus of elasticity of MDF different density at various temperature. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology*, Warszawa, 91, 101–106.
- Kulman, S. M., & Boiko, L. M. (2017). Accelerated method for predicting the durability of wood products and woodcomposite materials, taking into account the moisture. Patent of Ukraine to the utility model № 117175, MPK G01N 25/26 (in Ukrainian).
- Mamontov, S. A. (2012). Analysis of thermal aging of fibreboard. The state of modern construction science. Collection of scientific works X-th International. scientific-practical Internet conf. Poltava, Ukraine, 53–57 (in Ukrainian)..
- Market of fiberboard (fiberboard). Current situation and forecast for 2018–2022. Retrieved from <http://alto-group.ru/otchot/marketing/449-rynok-dvp-tekushhaya-situaciya-i-prognoz-2014-2018-gg.html>
- Microtrends: Why does your kitchen have a very thin tabletop., 2018. Retrieved from <https://www.houzz.ru/ideabooks/86699028/list/mikrotrendy-zachem-vashey-kuhne-ocheny-tonkaya-stoleshnitsa>

- Mohebbi, B., Ilbeighi, F., & Kazemi-Najafi, S. (2008). Influence of hydrothermal modification of fibers on some physical and mechanical properties of medium density fiberboard (MDF). *Holz als Roh und Werkstoff*, 66 (3), 213–218.
- Shi, S. Q., & Gardener, D. J. (2006). Hygroscopic thickness swelling rate of compression molded wood fiberboard and wood fiber/polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37 (9), 1276–1285.
- Sinha, A., Nairn, J. A., & Gupta, R. (2011). Thermal degradation of bending strength of plywood and oriented strand board: a kinetics approach. *Wood Science and Technology*, 45 (2), 315–333.
- The average service life of high-quality furniture (2017). Retrieved from <https://krdexpert.blogspot.com/2017/05/Garantiya-i-srok-sluzhby.html>
- The world market of MDF, 2018. Retrieved from <http://www.woodpanelsonline.com/downloads/mdf-yearbook-2016-2017/>
- Yu De Xin, & Birgit, A. L. (1983). Tensile strength properties of particle boards at different temperatures and moisture contents. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 41 (7), 281–286.

O. O. Pinchevska, O. V. Zavorotnuk (2019). The influence of polymeric binder aging on the woodfiber plates durability. UKRAINIAN JOURNAL OF FOREST AND WOOD SCIENCE, 10(2): 103-112. <http://dx.doi.org/10.31548/forest2019.02.103>.

The process of designing products from wood-fiber boards, namely MDF boards, is noted for its complexity due to the high heterogeneity of the distribution of components in volume, which has an effect on the mechanical properties of the material. Today, MDF boards are used as work surfaces in kitchen and bathroom furniture. As design solutions are becoming more widespread with the use of thin tabletops, it is necessary to set the lifetime of working surfaces of different thickness when operated in kitchens and bathrooms.

Accounting for the influence of climatic conditions of operation of tabletops on their durability, prediction of which is based on the kinetic strength theory, is necessary to determine the dependence of the binder state used in the manufacture of MDF boards on the temperature and duration of its operation. To this aim, it is proposed to introduce a resin degradation coefficient in the formula for calculating durability. Its dependence on these parameters is determined experimentally.

The degradation rate of the resin is determined by the loss of its mass during exposure to the temperature in the range of 20 °C to 90 °C for 0,08 h - 5 h. Fisher's criterion of the regression equation was obtained and proved adequacy of the equation, whose analysis allowed determining the negative strong influence of both factors on the destruction of the binding agent.

The calculation of theoretical durability was carried out at the simulation load of MDF boards 10 mm, 16 mm, and 19 mm in thickness according to the different climatic operating conditions. To do this, calculations of the internal stresses arising of the kitchen tabletop from the uniform loading by objects of 20 kg weight using the finite element method implemented in the SolidWorks program.

It has been determined that the obtained results of the theoretical durability of kitchen tabletops with consideration of the aging of the polymeric binder, are close to the recommended lifetime for kitchen furniture, which is on average 15-20 years.

Keywords: MDF boards, kitchen tabletops, resin degradation, efficiency.

Отримано : 20.12.2018 р.