

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДЕРЕВИНИ НА УДАРНІ ТА БАЛІСТИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ

Денис МИХАЙЛОВСЬКИЙ¹, Олег КОМАР²

^{1,2}Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037

¹ mykhailovskyi.dv@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3151-8630>

² komar_oa-2023@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0009-0004-4507-9178>

Анотація. Деревина є одним з найстаріших будівельних матеріалів. Проте з настанням промислової революції металеві та залізобетонні конструкції майже повністю витіснили деревину з ринку основних будівельних матеріалів. В той же час деревину широко використовують при виготовленні меблів, оздоблення, підлог, допоміжних конструкцій та інше, і це стосується всіх сфер людського життя і побуту. Окрему нішу займає деревина як матеріал фортифікаційних споруд, як найбільш доступний.

Дослідження балістичних характеристик деревини найбільш актуальні в криміналістиці, через факт того, що кулі випущені в міських умовах дуже часто, потрапляють в дерев'яні предмети [1].

Війна розв'язана російською федерацією в Україні змушує інженерів шукати найбільш раціональні матеріали для спорудження будівель як цивільного так і військового призначення. І в даному випадку деревина може бути конкурентно-спроможним матеріалом поряд з бетоном та сталлю, з огляду на доволі хорошу здатність деревини поглинати енергію.

Певні види деревини вважаються ударостійкими, так бук використовується для виготовлення головок молотків [3]. Окрім суцільної деревини існує досить велика кількість матеріалів на основі деревини, таких як: клеєна деревина, поперечно-клеєна деревина, брус з клеєного шпону та багато інших.

Дані матеріали вже широко використовуються при зведенні як малоповерхових та багатоповерхових будівель. Властивості даних матеріалів на сприйняття вертикальних та горизонта-



Денис МИХАЙЛОВСЬКИЙ

професор кафедри металевих та дерев'яних конструкцій,
д.т.н., професор



Олег КОМАР

аспірант кафедри металевих та дерев'яних конструкцій

льних навантажень активно досліджуються починаючи з 60-х років минулого століття. Проте характеристики на ударну міцність та балістичні властивості даних матеріалів майже не дослідженні.

В цій роботі розглянуті питання стану сучасних досліджень балістичних властивостей деревини та матеріалів на її основі з перспективою подальших досліджень і використання в спорудах інженерного захисту.

Ключові слова: дерев'яні конструкції; захисні конструкції; фортифікаційні споруди; клеєна деревина; поперечно-клеєна деревина; брус з клеєного шпону; балістичні навантаження; ударні навантаження; рикошет.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В XIX столітті Велика Британія витратила великі кошти на будівництво військових дерев'яних кораблів, корпуси

яких повинні були витримувати удари від гарматних ядер, і для аналізу було зібрано велику кількість інформації про проникнення в деревину об'єктів з високою швидкістю [3]. Проте сталеві конструкції витіснили деревину з кораблебудування, а після появи залізобетону деревина втратила лідируючі позиції і в сфері будівельних конструкцій. З того часу дослідження деревини на ударні навантаження майже не проводились.

Окрім того в минулому столітті з'явився ряд нових матеріалів на основі деревини, таких як:

- клеєна деревина (далі – КД) – матеріал, який утворюється шляхом склеювання окремих дошок в досить великий масив (рис.1);

- поперечно-клеєна деревина (далі – ПКД) – відносно новий матеріал, який утворюється шляхом склеювання окремих дошок у взаємно-перпендикулярному напрямку в суміжних шарах, що дозволяє виготовляти масивні панелі різної товщини (рис.2). Завдяки своїм перевагам, (екологічність, відносно невелика вага в порівнянні з бетоном і сталлю, сейсмічна стійкість та інше) утворює конкуренцію для поширених будівельних конструкцій;

- брус з клеєного шпону або LVL – брус – являє собою конструкційний матеріал,

вироблений методом склеювання так званого лущеного шпону (рис. 3). LVL-брус був розроблений в США ще в 1935 році, а широке застосування отримав в 60-их роках минулого сторіччя.

- МДФ плита – це деревноволокниста плита середньої щільності, яка виготовляється з дуже дрібної тирси деревини, дрібнішою за ту, що використовують для виробництва дерево-стружкової плити (рис.4).

Вже давно відомо, що промислові матеріали з пористою структурою можуть досить добре поглинати енергію під час ударів, наприклад матеріали з піно-полістиролу використовуються для захисту матеріалів, що б'ються при транспортуванні. У більшості цих елементів енергія поглинається через згин клітинних стінок. Цілком логічно, що деревина, через свою пористу структуру поводитися подібно до даних матеріалів [4,8].

Мета цієї роботи полягає в аналізі існуючих досліджень деревини та дерев'яних виробів на ударні та балістичні навантаження, що допоможе в подальшому розробити методику по розрахунку виробів і споруд в цілому з клеєної, поперечно-клеєної деревини та LVL – бруса на такі чи подібні навантаження.

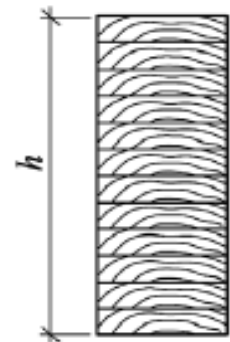
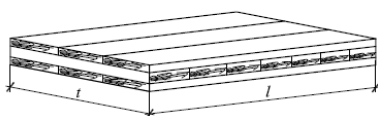
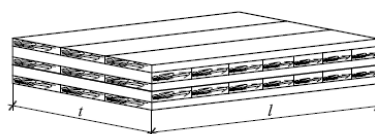


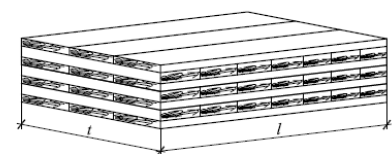
Рис 1. Переріз елемента з клеєної деревини
Fig. 1. Cross-section of a glued laminated timber element



3-х-шарова ПКД-панель



5-ти-шарова ПКД-панель



7-ми-шарова ПКД-панель

Рис 2. Панелі з поперечно-клеєної деревини

Fig. 2. Cross-laminated timber panels

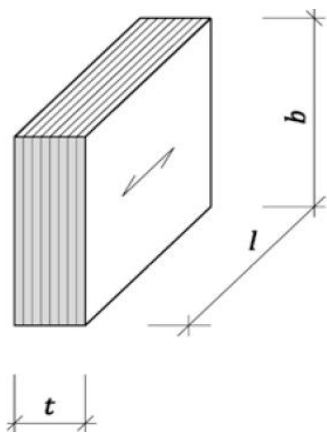


Рис 3. LVL брус
Fig. 3. LVL beam



Рис4. МДФ плита
Fig. 4. MDF plate

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розглянемо основні опубліковані роботи пов'язані з тематикою нашого дослідження.

В роботі David G. Hepworth, J. F. V. Vincent, G. Stringer і G. JERONIMIDIS [4] розглянуте питання щодо роботи дерев'яних конструкцій на стиск та ударне навантаження.

В рамках цієї публікації авторами проводились мікроскопічні дослідження взаємозв'язку між показниками щільності та її ударостійкості хвойних та листяних порід цільної деревини. Основні показники щільності деревини та вологості наведено в табл. 1. Як видно з рис. 5 відслідковується чіткий зв'язок між ударостійкістю і щільністю хвойних порід (чим більша щільність тим більше максимальне навантаження витримує деревина). Однак енергія, поглинена в точці максимального навантаження (і на початку руйнування зразка), є різною для трьох листяних порід деревини однакової щільності; бук і гікорі поглинають приблизно однакову кількість енергії, тоді як дуб поглинає набагато менше. Також як ми бачимо, листяні породи деревини витримують значно більше ударне навантаження та поглинають значно більше енергії ніж хвойні. Дані явища пов'язані з будовою деревини: хвойна деревина в основному складається з трахеїдних клітин (30-50 мкм в поперечнику); листяна деревина має менші клітинні волокна, а також містить судини (50-500 г у поперечнику).

Табл. 1. Щільність і вміст води в різних породах деревини, що використовувались для випробувань на ударні навантаження [3]

Table 1. Density and moisture content of different wood species used for impact tests

Тип деревини	Щільність при 22°C і відносній вологості 60%. (кг/м ³)	Вміст води при 22°C і відносній вологості 60% (% сухої ваги)
Білий дуб	692	11,3
Бук	700	11,8
Карія (Гікорі)	687	13,9
Ялина 1	393	15,1
Ялина 2	410	11,0

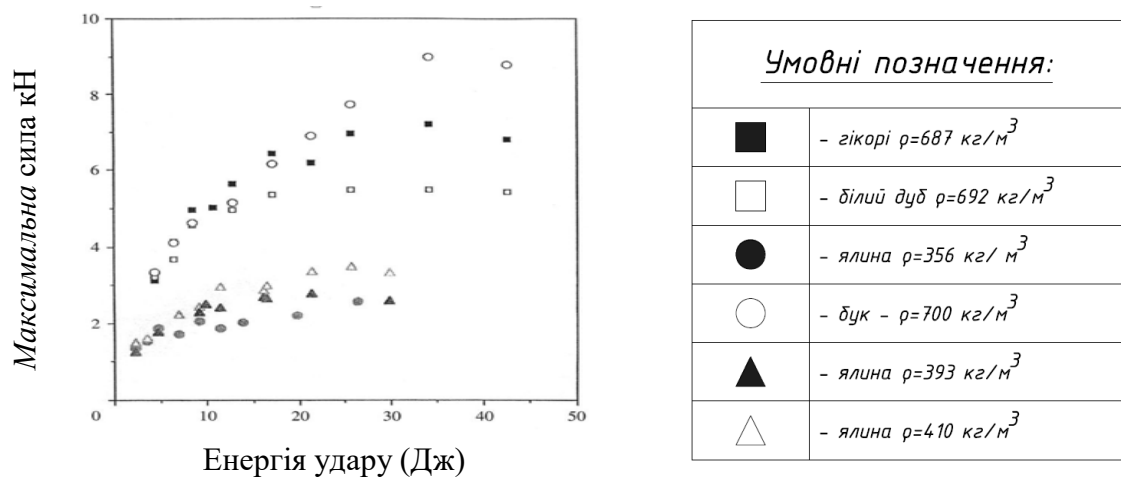


Рис 5. Максимальне навантаження, яке витримується під час ударів, нанесене на графік як функція енергії удару.

Fig. 5. Maximum load sustained during impacts plotted as a function of impact energy.

Як видно з рис. 5 відслідковується чіткий зв'язок між ударостійкістю і щільністю хвойних порід (чим більша щільність тим більше максимальне навантаження витримує деревина). Однак енергія, поглинена в точці максимального навантаження (і на початку руйнування зразка), є різною для трьох листяних порід деревини однакової щільності; бук і гікорі поглинають приблизно однакову кількість енергії, тоді як дуб поглинає набагато менше.

Також як ми бачимо, листяні породи деревини витримують значно більше ударне навантаження та поглинають значно більше енергії ніж хвойні. Дані явища пов'язані з будовою деревини: хвойна деревина в основному складається з трахеїдних клітин (30-

50 мкм в поперечнику); листяна деревина має менші клітинні волокна, а також містить судини (50-500 г у поперечнику).

В роботі Koene L., Broekhuis F.R. [1] розглянуте питання щодо роботи дерев'яних конструкцій на балістичні навантаження.

В роботі представлені результати експериментальних досліджень на пробивання деревини різних порід кулями калібром 9 мм. Породи деревини, що досліджувалась, та фізико-механічні властивості зразків наведено в табл. 2. Результати глибини проникнення кулі в деревину були перевірені за допомогою аналітичних моделей Понселе та Ейлера-Робінсона.

Табл. 2. Фізико-механічні властивості деревини, що досліджувались на пробиття
Table 2. Physico-mechanical properties of wood tested for penetration

Тип деревини	Виміряна щільність, кг/м^3	Межа міцності на розрив, МПа	Міцність на зсув, МПа	Твердість за шкалою Янка, Н
Дугласія тисолиста	519	2,3-130	9,4	2940
євро Сосна	510	2,9-102	7,5	2940
євро Дуб	862	3-109	11,5	6280
Мербау	744	-	12,4	6700-8670
Бангкірай	861	-	13,6	7300
Азобе (Люфіра)	1088	120-217	17,1	17000

Модель Понселе – згідно [1] це модель, згідно якої твердість матеріалу до перфорації може бути визначена за допомогою двох компонентів, а саме:

$$m_p = \frac{d_v}{d_t} = F = -\beta - \alpha \vartheta^2 \quad (1)$$

де: m_p — маса снаряда,

ϑ — швидкість снаряда в заданий момент часу t ,

β — параметр, в якому домінує міцність матеріалу,

α — внесок інерційних напружень.

Інтегрування рівняння 1 дає можливість визначити глибину проникнення як функцію початкової швидкості удару:

$$P = \frac{m_p}{2\alpha} l_n \left(1 + \frac{\alpha \vartheta_i^2}{\beta} \right) \quad (2)$$

Параметри α і β визначаються експериментально за даними проникнення. Модель Понселе використовувалася для опису проникнення в пісок і багато інших матеріалів.

Другою моделлю визначення глибини перфорації є модель Робінсона-Ейлера, згідно [1] глибина перфорації матеріалу визначається за формулою:

$$P = \frac{m_p \vartheta_i^2}{2\beta} \quad (3)$$

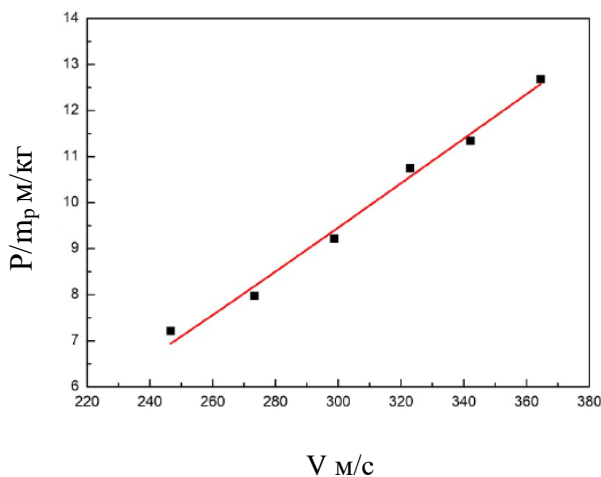


Рис. 6. Експериментальна глибина проникнення для MDF Premier.

Fig. 6. Experimental penetration depth for MDF Premier

В даній моделі сповільнення снаряду рахується постійним. Модель застосовується, наприклад, для удару загартованих сталевих стрижнів по алюмінієвих мішенях [1].

Після проведення випробування зразків та виконання аналітичних розрахунків було показано, що середня глибина пробиття зразків склала 135мм при швидкостях кулі 240-370 м/с.

Публікація Коене L., Broekhuis F.R. [3] також присвячена експериментальним дослідженням пробивання кулями калібром 9мм такого матеріалу деревоволокнистої плити середньої щільності.

Постріли виконувались з відстані 20м, швидкість кулі складала 240-360м/с. Результати пробиття деревоволокнистих плит показано на рис. 6, де показано глибину проникнення P , нормалізовану за масою снаряда m_p , у залежності від швидкості удару для MDF панелі. Лінія представляє підгонку до моделі Понселе.

Результати розрахунку були порівняні з моделлю Полонсе, яка значно краще описує пробиття кулями деревоволокнистої плити ніж модель Робінсона-Ейлера. При швидкості 240 м/с глибина пробиття складала 56 мм, при швидкості 360 м/с глибина пробиття складала 100,8мм.

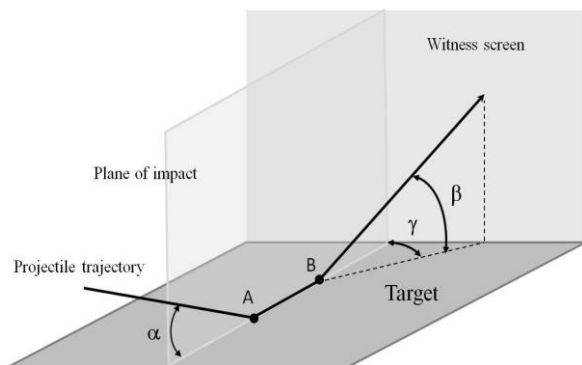


Рис 7. Траєкторія рикошетної кулі

Fig. 7. Trajectory of a ricocheting bullet

Дослідженню рикошетів снаряду присвячено роботу Коене L., Broekhuis F.R. [2]. В публікації детально розглянуто експериментальні дослідження рикошету від дерев'яних цілей з різними фізико-механічними властивостями куль калібру 7,65 мм. На рис. 3. показана траєкторія рикошетної кулі з кутом удару α , кутом рикошету β і кутом відхилення γ . Снаряд влучає в ціль у точці А і залишає ціль у точці В.

З отриманих результатів експерименту були зроблені наступні висновки:

Кут рикошету більший ніж кут удару, що є не типовою ситуацією для таких матеріалів як сталь чи залізобетон. Дана ситуація викликана тим, що всі дерев'яні мішені м'якші, ніж матеріал снаряда і мішень деформується під час удару й утворюється кратер. Це можливо тому, що всі дерев'яні мішені м'якші, ніж матеріал снаряда.

Отримані результати показують, що втрати енергії снаряда на рикошет складають не менше 70%. Ця значна кількість енергії втрачається під час деформації снаряда та матеріалу мішені, тобто утворення кратера, під час процесу рикошету.

Результати експерименту показують, що розташування волокон дерев'яного елемента, від якого відбувається рикошет, може мати значний вплив на кут відхилення рикошету. Проте з слів авторів, дане твердження потребує додаткових досліджень.

Дослідження пробиття деревини нормативно задокументованими є в США. Так в UFC 4-023-07 [9] товщина пробиття визначається за формулою [4]:

$$T_w = 9837 \left(\frac{g^{0.4113} m^{1.4897}}{\rho \left(\frac{\pi d^2}{4} \right)^{1.3596} H^{0.5414}} \right) \quad (4)$$

де T_w – максимальна товщина пробивання деревини снарядом, дюйм;
 d – діаметр снаряду, дюйми;
 m – маса снаряду, фунт;
 V – швидкість снаряду, фут/с;
 ρ – щільність деревини, фунт/фут³;
 H – твердість деревини, фунт.

В метричних одиницях формула (4) набуває вигляду:

$$T_w = 0,64 \left(\frac{g^{0.4113} m^{1.4897}}{\rho \left(\frac{\pi d^2}{4} \right)^{1.3596} H^{0.5414}} \right) \quad (5)$$

де T_w – максимальна товщина пробивання деревини снарядом, м;
 d – діаметр снаряду, м;
 m – маса снаряду, кг;
 V – швидкість снаряду, м/с;
 ρ – щільність деревини, кг/м³;
 H – твердість деревини, кг.

Густина і твердість деяких порід деревини вказана в табл.3.

Залишкова швидкість снаряду після пробиття дерев'яної цілі визначається за формулою:

$$g_r = g \left[1 - \left(\frac{t}{T_w} \right)^{0.5735} \right] \quad (6)$$

де t – фактична товщина мішені, м.

Надані формули наведені для суцільної деревини, проте вони ніяк не враховують багаточастотність елементів і можливість їх застосування для клеєної деревини та ПКД необхідно встановити як експериментально так і чисельно. В нормативній базі України дані про дослідження деревини на балістичні навантаження відсутні.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Після проведення огляду літератури по дослідженню дерев'яних конструкцій на ударні та балістичні навантаження можна зробити наступні висновки:

Дослідження балістичних властивостей деревини в світі проводяться в основному з точки зору криміналістики, вплив на будівельні конструкції, та зміна фізико-механічних характеристик та міцності дерев'яних матеріалів не проводиться;

Балістичні та ударні навантаження залежать від щільності та структури деревини. В Україні дослідження даних параметрів для деревини відсутні.

Табл. 3. Густина та твердість деревини згідно [9]
Table 3. Density and hardness of wood according to [9]

Тип деревини	Вологість деревини	Щільність деревини, фунт/фут ³	Твердість деревини, фунт
Сосна	Суха	23,5	9,4
	Волога	30	7,5
Клен	Сухий	35	11,5
	Вологий	40	12,4
Зелений дуб	Сухий	55	13,6
	Вологий	55	
Гікорі	Сухий	50	17,1
	Вологий	55	

Листяна деревина значно краще витримує ударні навантаження ніж хвойна, це пов'язано з більшою щільністю листяної деревини, та відміною в структурній будові;

В інженерній методиці пробиття деревини найбільш виділяються дві основні моделі:

- модель Понселе;
- модель Робінсона-Ейлера;

Проте дані моделі також потребують уточнення експериментальним шляхом параметрів для конкретної деревини, що досліджується, дані результати для лісів України не проводились.

Дослідження конструкцій з ПКД та LVL-брусу, які можуть буди несучими елементами для укриттів та споруд цивільного та військового захисту, на балістичні та ударні навантаження відсутні в Україні, та майже не проводяться в світі, що робить дані дослідження надзвичайно актуальним.

Дослідження деревини на ударні та балістичні навантаження на даному етапі, можливо лише з проведенням експериментальних досліджень, методики чисельного моделювання дерев'яних конструкцій на балістичні навантаження відсутні, і потребуються розробки.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Koene L., Broekhuis F.R. (2017)** Bullet penetration into wooden targets", *30th international symposium on ballistics Long Beach, CA, September 11–15; 1905-1916.* <https://doi.org/10.12783/ballistics2017/16976>
2. **Koene L., Hermesen R., & Brouwer S. D. (2013)** Projectile ricochet from wooden targets, *27th international symposium on ballistics freiburg, Germany, April 22–26, 2013; 1195-1205.* <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13023>
3. **Koene L., Brouwer S. D. (2019)** Bullet penetration into medium density fibreboard targets, conference: *31st international symposium on ballistics, 2019 AT: Hyderabad, India, November 2019; 1363-1373* <https://doi.org/10.12783/ballistics2019/33172>
4. **David G. Hepworth, J. F. V. Vincent, G. Stringer & Jeronimidis G. (2002)** Variations in the morphology of wood structure can explain why hardwood species of similar density have very different resistances to impact and compressive loading, *The Royal Society 2002, 255-272.* <https://doi.org/10.1098/rsta.2001.09275>
5. **Михайловський Д. В. (2022)** Розрахунок панельних будинків з поперечно-клеєної деревини. *Монографія - К.: КНУБА, - 220 с.*
6. **Mykhaylovsky, D., & Komar, M. (2020).** Інженерна методика розрахунку елементів з клеєної деревини армованої композитною арматурою. *Будівельні конструкції. Теорія і практика, (7), 93–100.* <https://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020.93-100>
7. **Mykhailovskyi D. V., Skliarov I. O. (2023)** Methods of calculation and engineering protection of critical infrastructure objects and other strategic facilities against long-range projectiles / *Strength of materials and theory of structures: scientific and technical collection - Kyiv: KNUBA, - Issue 111. - P. 155-17.* <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.155-171>
8. **Михайловський Д. В. (2017)** Застосування

- деревини та деревинних матеріалів у будівництві / *Міжнародний інформаційно-технічний журнал Обладнання та інструмент для професіоналів (дерево-обробка) - №4 / 199. - Харків, - С.40 – 44.*
9. **U. S. Army Corps Of Engineers**, unified facilities criteria (ufc) 4-023-07 design to resist direct fire weapons effects, 2008.
 10. **Комар О. А., Михайловський Д. В.** Аналіз існуючих методик розрахунку поперечно-класної деревини на балістичні навантаження / *Conference proceedings International scientific-practical conference of young scientists Build-Master-Class 2024 (Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів) // К.: KNUCA, 2024. – 568 р. Р.201-202.*
 11. **Report of the asce committee on the impactive and impulsive loads** / *proc. Of the second ascee conference “civil engineering and nuclear power”. Vol. V. Knoxville, tennessee. Sept. 15-17, 1980.*
 12. **Sliter g. E.** Assessment of empirical concrete impact formulas // *proc. Asce. 1980. Vol. 106, no. St5. P. 1023–1045.*
 13. **Buildings and infrastructure protection series** / *Preventing structures from collapsing to limit damage to adjacent structures and additional loss of life when explosives devices impact highly populated urban centers bips 05/June 2011 – 510 p.*
 14. **UFC 4-023-03** Design of buildings to resist progressive collapse / *USA, Department of Defense, 2009 – 245p.*
 15. **UFC 4-023-07** Unified facilities criteria. Design to resist direct fire weapons effects. Change 1 / *U.S. Army Corp Of Engineers, naval facilities engineering comand, air force civil engineer support agency, 2017 – 66 p.*
 16. **UFC 4-023-03** Design Of Buildings To Resist Progressive Collapse. Change 3 / *U.S. Army Corp Of Engineers, naval facilities engineering comand, air force civil engineer support agency, 2016 – 227 p.*
 17. **Hakan Hansson** Warhead penetration in concrete protective structures. *Licentiate thesis in civil and architectural engineering. Stockholm, Sweden 2011 ISSN 1103-4270 – 126 p. appendix – 47 p.*
 18. **Forss S.** The russian operational-tactical iskander missile system / *National defence university, department of strategic and defence studies; Series 4: working papers #42, Helsinki 2012 – 26 p.*
 19. **Harlin W. J., Cicci David A.** Ballistic missile trajectory prediction using a state transition matrix / *Applied Mathematics and Computation 188 (2007) pp.1832–1847*
 20. **Likely Shahed-136** U.A.S Technical report/ *FIT UK SECRET REL UKRAINE, - 10 p.*
 21. **Informational and analytical material on the use of unmanned aerial systems of the russian federation SHAHED-136 (“GERANIUM-2”), SHAHED-129 AND MOHAJER-6.** (Confirmed deputy head of the general staff of the armed forces of ukraine 09/29/2022) *Kyiv. Military Unit A4629. – 18 p.*
 22. **ДБН В.2.2-5** “Захисні споруди цивільного захисту” – *Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, Київ, 2023 – 123 с.*
 23. **UFC-3-340-02** Unified facilities criteria. Structures to resist the effects of accidental explosions. Change 2 / *U.S. Army Corp Of Engineers, naval facilities engineering comand, air force civil engineer support agency, 2014 – 1867 p*
 24. **International ammunition technical guidelines. Formulae for ammunition management.** *IATG 01.80. Third edition, UNODA, March 2021 – 43 p.*
 25. **ДБН В.1.2-14** «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ.» - *Київ: Мінрегіонбуд України. 2009 – 24 с.*

REFERENCES

1. **Koene L., Broekhuis F.R. (2017)** Bullet penetration into wooden targets”, *30th international symposium on ballistics Long Beach, CA, September 11–15; 1905-1916.* <https://doi.org/10.12783/ballistics2017/16976>
2. **Koene L., Hermsen R., & Brouwer S. D. (2013)** Projectile ricochet from wooden targets, *27th international symposium on ballistics freiburg, Germany, April 22–26, 2013; 1195-1205.* <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13023>
3. **Koene L., Brouwer S. D. (2019)** Bullet penetration into medium density fibreboard targets, conference: *31st international symposium on ballistics, 2019 AT: Hyderabad, India, November 2019; 1363-1373* <https://doi.org/10.12783/ballistics2019/33172>
4. **David G. Hepworth, J. F. V. Vincent, G. Stringer & Jeronimidis G. (2002)** Variations in

- the morphology of wood structure can explain why hardwood species of similar density have very different resistances to impact and compressive loading, *The Royal Society* 2002, 255-272.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2001.09275>
5. **Mykhailovskyi D. V. (2022)** Rozrakhunok panelnykh budynkiv z poperechno-kleienoi derevyny. *Monohrafiia - K.: KNUBA*, - 220 s.
 6. **Mykhaylovsky, D., & Komar, M. (2020)**. Inzhenerna metodyka rozrakhunku elementiv z kleienoi derevyny armovanoi kompozytnoiu armaturoiu. *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka*, (7), 93–100.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020.93-100>
 7. **Mykhailovskyi D. V., Skliarov I. O. (2023)** Methods of calculation and engineering protection of critical infrastructure objects and other strategic facilities against long-range projectiles / *Strength of materials and theory of structures: scientific and technical collection - Kyiv: KNUBA*, - Issue 111. - P. 155-17.
<https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.155-171>
 8. **Mykhailovskyi D. V. (2017)** Zastosuvannia derevyny ta derevynnykh materialiv u budivnytstvi / *Mizhnarodnyi informatsiino-tekhnichnyi zhurnal Obladnannia ta instrument dlia profesionaliv (derevoobrobka) - №4 / 199. Kharkiv*, S.40 – 44.
 9. **U. S. Army Corps Of Engineers**, unifed facilities criteria (ufc) 4-023-07 design to resist direct fire weapons effects, 2008.
 10. **Komar O. A., Mykhailovskyi D. V.** Analiz isnuiuchykh metodyk rozrakhunku poperechno-kleienoi derevyny na balistychni navantazhennia / *Conference proceedings International scientific-practical conference of young scientists Build-Master-Class 2024 (Tezy dopovidei mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh vchenykh, aspirantiv i studentiv) // K.: KNUCA*, 2024. – 568 p. P.201-202.
 11. **Report of the asce committee on the impactful and impulsive loads** / *proc. Of the second ascee conference “civil engineering and nuclear power”*. Vol. V. Knoxville, tennessee. Sept. 15-17, 1980.
 12. **Sliter g. E.** Assessment of empirical concrete impact formulas // *proc. Asce*. 1980. Vol. 106, no. St5. P. 1023–1045.
 13. **Buildings and infrastructure protection series** / *Preventing structures from collapsing to limit damage to adjacent structures and additional loss of life when explosives devices impact highly populated urban centers bips 05/June 2011 – 510 p.*
 14. **UFC 4-023-03** Design of buildings to resist progressive collapse / *USA, Department of Defense*, 2009 – 245p.
 15. **UFC 4-023-07** Unified facilities criteria. Design to resist direct fire weapons effects. Change 1 / *U.S. Army Corp Of Engineers, naval facilities engineering comand, air force civil engineer support agency*, 2017 – 66 p.
 16. **UFC 4-023-03** Design Of Buildings To Resist Progressive Collapse. Change 3 / *U.S. Army Corp Of Engineers, naval facilities engineering comand, air force civil engineer support agency*, 2016 – 227 p.
 17. **Hakan Hansson** Warhead penetration in concrete protective structures. *Licentiate thesis in civil and architectural engineering. Stockholm, Sweden 2011 ISSN 1103-4270 – 126 p. appendix – 47 p.*
 18. **Forss S.** The russian operational-tactical iskander missile system / *National defence university, department of strategic and defence studies; Series 4: working papers #42, Helsinki 2012 – 26 p.*
 19. **Harlin W. J., Cicci David A.** Ballistic missile trajectory prediction using a state transition matrix / *Applied Mathematics and Computation* 188 (2007) pp.1832–1847
 20. **Likely Shahed-136** U.A.S Technical report/ *FIT UK SECRET REL UKRAINE*, - 10 p.
 21. **Informational and analytical material on the use of unmanned aerial systems of the russian federation SHAHED-136 (“GERANIUN-2”), SHAHED-129 AND MOHAJER-6.** (Confirmed deputy head of the general staff of the armed forces of ukraine 09/29/2022) *Kyiv. Military Unit A4629. – 18 p.*
 22. **DBN V.2.2-5** “Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu” – *Ministerstvo rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy, Kyiv*, 2023 – 123 s.
 23. **UFC-3-340-02** Unified facilities criteria. Structures to resist the effects of accidental explosions. Change 2 / *U.S. Army Corp Of Engineers, naval facilities engineering comand, air force civil engineer support agency*, 2014 – 1867 p
 24. **International ammunition technical guidelines. Formulae for ammunition management.** *IATG 01.80. Third edition, UNODA, March 2021 – 43 p.*

25.**DBN V.1.2-14** "System for ensuring the reliability and safety of construction sites. General principles for ensuring the reliability and structural safety of buildings, structures, building structures and foundations." - Kyiv: *Ministry of Regional Development of Ukraine*. 2009 - 24 p.

ANALYSIS OF EXISTING STUDIES ON WOOD UNDER IMPACT AND BALLISTIC LOADS

*Denis MYKHAYLOVSKYI,
Oleh KOMAR*

Abstract. Wood is one of the oldest building materials. However, with the advent of the industrial revolution, metal and reinforced concrete structures have almost completely displaced wood from the market of basic building materials. At the same time, wood is widely used in the manufacture of furniture, decoration, floors, auxiliary structures, etc., and this applies to all spheres of human life and everyday life. A separate niche is occupied by wood as a material for fortifications, as the most accessible. Studies of the ballistic characteristics of wood are most relevant in forensics, due to the fact that bullets fired in urban conditions very often hit wooden objects [1].

The war unleashed by the Russian Federation in Ukraine forces engineers to look for the most rational materials for the construction of buildings for both civilian and military purposes. And in this case, wood can be a competitive material along with concrete and steel, given the fairly good ability of wood to absorb energy. Certain types of wood are considered impact-resistant, so beech is used for the manufacture of hammer heads [3]. In addition to solid wood, there are quite a large number of wood-based materials, such as: glued wood, cross-laminated timber, glued veneer lumber and many others. These materials are already widely used in the construction of both low-rise and multi-story buildings. The properties of these materials for the perception of vertical and horizontal loads have been actively studied since the 1960s. However, the characteristics of impact strength and ballistic properties of these materials have hardly been studied. This paper considers the state of modern research on the ballistic properties of wood and materials based on it with the prospect of further research and use in engineering protection structures.

Keywords: wooden structures; cross-laminated timber (CLT); LVL (Laminated Veneer Lumber); ballistic loads; impact loads; ricochet.

Стаття надійшла до редакції 5.10.2024 р.