

АНОТАЦІЯ

Бітюков Д.О. Робота багат шарових балок з клеєної деревини при дії імпульсних навантажень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія, галузь знань 19 – Архітектура та будівництво. – Київський національний університет будівництва і архітектури. Міністерство освіти і науки України, Київ, 2026 р.

Основний зміст дисертаційної роботи

Дисертаційна робота присвячена експериментальним та теоретичним дослідженням роботи дерев'яних балок з суцільної, клеєної та перехресно-клеєної деревини під дією зосередженого імпульсного навантаження (удару).

За результатами проведених експериментальних та теоретичних досліджень, оглядів та числових досліджень:

- проведено аналіз літературних наукових джерел та нормативної бази на рахунок сучасних методів розрахунку балок з суцільної, клеєної та перехресно-клеєної деревини на імпульсні впливи, зокрема на зосереджений імпульс (удар);
- проведено статичні випробування досліджуваних зразків балок з метою визначення модулів деформації та модулів деформації зсуву;
- розроблено експериментальну установку для дослідження динамічних властивостей дерев'яних балкових елементів;
- розроблено методологічний підхід експериментального дослідження динамічних властивостей дерев'яних балкових елементів на підставі роботи елемента під дією імпульсного навантаження;
- встановлено нові закономірності роботи балок з суцільної, клеєної та перехресно-клеєної деревини під час дії зосередженого імпульсного навантаження (удару) і порівняно їх динамічний відгук;
- розповсюджено теорію коливань пружних балок Тимошенко С.П. з урахуванням деформації зсуву перерізу на роботу балкових елементів з суцільної, клеєної та перехресно-клеєної деревини;

- узагальнено методологічні підходи дослідження фізико-механічних характеристик суцільної, клеєної та перехресно-клеєної деревини.
- удосконалено аналітичні моделі прогнозування динамічного відгуку дерев'яних балок за рахунок уточнення декрементів затухання для балок з суцільної, клеєної та перехресно-клеєної деревини;

Дисертаційна робота спрямована на поглиблення наукового розуміння закономірностей поведінки складних інженерних систем в умовах динамічних впливів. Дослідження багатошарових дерев'яних балок при дії імпульсних навантажень розглядається як процес уточнення й розвитку існуючих теоретичних фізико-математичних моделей, через інтеграцію експериментального пізнання, чисельного моделювання та аналітичного узагальнення.

У першому розділі проведено аналіз та узагальнено сучасний стан наукових досліджень і світовий досвід застосування дерев'яних конструкцій в умовах динамічних навантажень. Проаналізовано особливості використання інженерних дерев'яних матеріалів, зокрема клеєної та перехресно-клеєної деревини, у сучасному будівництві, а також встановлено їхню ефективність при дії динамічних та імпульсних впливів. Розглянуто основні закономірності формування динамічного відгуку конструкцій, включаючи роль демпфувальних властивостей, механізми дисипації енергії та вплив конструктивних і матеріальних параметрів на процес затухання коливань. Проаналізовано підходи до визначення коефіцієнтів динамічності та їх нормативне забезпечення, а також особливості чисельного моделювання динамічної роботи конструкцій із використанням методу скінченних елементів. Встановлено, що, незважаючи на значний обсяг досліджень, питання динамічної роботи багатошарових дерев'яних балок при дії зосереджених імпульсних навантажень залишаються недостатньо вивченими, що обумовлює необхідність подальших експериментальних і теоретичних досліджень.

В другому розділі розроблено та реалізовано комплексну методику експериментальних досліджень дерев'яних балок із суцільної, клеєної та перехресно-клеєної деревини. Програма випробувань передбачала послідовне

проведення статичних і динамічних досліджень із метою визначення жорсткісних і динамічних характеристик зразків.

На етапі статичних випробувань визначено пружні характеристики балок при поперечному згині в межах лінійно-пружної роботи матеріалу. Динамічні дослідження виконано із застосуванням спеціально розробленого стенда з маятниковим механізмом, що забезпечує відтворення однократного імпульсного навантаження та реєстрацію вільних коливань. Це дозволило встановити основні динамічні параметри, зокрема власні частоти і характеристики затухання.

Особливу увагу приділено забезпеченню чистоти експерименту: уніфікації умов виготовлення зразків, вдосконаленню опорних вузлів та застосуванню високоточної вимірювальної апаратури. Для підвищення достовірності результатів використано методи статистичної обробки даних із застосуванням критерію Стьюдента.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень фізико-механічних та динамічних характеристик балок із суцільної, клеєної та перехресно-клеєної деревини. За результатами статичних випробувань визначено модулі деформації та модулі деформації зсуву: для суцільної деревини - $E_{ST} = 7.66$ ГПа; $G_{ST} = 0.48$ ГПа, для клеєної - $E_{GLT} = 7.30$ ГПа; $G_{GLT} = 0.46$ ГПа, для перехресно-клеєної - $E_{CLT} = 5.88$ ГПа; $G_{CLT} = 0.37$ ГПа. Встановлено, що найбільшу жорсткість мають балки із суцільної деревини, тоді як для багатошарових матеріалів спостерігається її зниження. Експериментальні залежності «навантаження–прогин» мають лінійний характер, що підтверджує роботу матеріалу в пружній області.

Дослідження динамічної поведінки показали, що максимальні переміщення балок зростають пропорційно величині імпульсного навантаження. На основі спектрального аналізу визначено власні частоти коливань, які становлять 75 Гц для суцільної деревини, 73 Гц - для клеєної та 67 Гц - для перехресно-клеєної, із задовільною збіжністю з теоретичними значеннями.

Встановлено експоненційний характер затухання коливань та визначено логарифмічний декремент затухання: для суцільної деревини $\beta = 0.186$, для

клеєної та перехресно-клеєної деревини $\beta = 0.099$, що свідчить про інтенсивніше розсіювання енергії у суцільній деревині.

Отримані результати підтверджують суттєвий вплив структури деревини на жорсткісні та динамічні характеристики балок.

В четвертому розділі виконано комплексне експериментально-теоретичне дослідження роботи дерев'яних балок із суцільної, клеєної та перехресно-клеєної деревини при статичному та імпульсному навантаженні (ударі). Встановлено, що результати чисельного моделювання прогинів у програмному комплексі Dlubal RFEM5 добре узгоджуються з експериментальними даними статичних випробувань: для 1D та 3D моделей балок із суцільної, клеєної та перехресно-клеєної деревини похибка не перевищує 1-3%, тоді як для CLT-балок при моделюванні 3D елементами зі збереженням орієнтації ламелей та застосуванням моделі матеріалу як для СД похибка досягає 17%.

Аналітичний розрахунок за методикою С.П. Тимошенка показав добру відповідність експерименту: відхилення становлять до 7.5% для клеєної деревини, до 11% для перехресно-клеєної та близько 1.5% для суцільної деревини. Чисельний динамічний аналіз у Dlubal RFEM5 модуль RF-DYNAM Pro дає консервативні результати із запасом: 10% (СД), 18% (КД) та 17% (ПКД).

Розраховані коефіцієнти динамічності за експериментальними даними становлять: 0.0632 (СД), 0.0559 (КД), 0.0545 (ПКД), а теоретично обчислені значення коефіцієнтів для трикутної апроксимації вихідного імпульсу: 0.0571 (СД), 0.0543 (КД) та 0.0476 (ПКД), відхилення складає до 13%.

Отримані результати підтверджують можливість використання спрощених аналітичних підходів і трикутної апроксимації імпульсного навантаження для інженерних розрахунків із достатньою точністю.

Ключові слова: деревина, балки, суцільна деревина, клеєна деревина, перехресно-клеєна деревина, власні коливання, декремент затухання, коефіцієнт динамічності, імпульсне навантаження, удар, динамічне навантаження, модуль деформації, модуль деформації зсуву, фізико-математичне моделювання роботи дерев'яних балок складеного перерізу, напружено-деформований стан, числові

дослідження, метод скінчених елементів, аналітичні дослідження, експериментальні дослідження на натурних зразках, експериментальний стенд, дисипація енергій, будівельні конструкції, числове моделювання.

ABSTRACT

Bitiukov D. Behavior of multi-layer glued timber beams under impulsive loading.
– Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis on conferment of a scientific degree of the Doctor of Philosophy on a specialty 192 – Building and civil engineering, area of knowledge 19 – Architecture and building. – Kyiv National University of Construction and Architecture. Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The main content of the thesis.

The thesis is devoted to experimental and theoretical investigations of the behavior of solid, glued laminated timber, and cross-laminated timber beams subjected to concentrated impulsive loading (impact).

Based on the results of experimental, theoretical, review, and numerical studies:

- an analysis of scientific literature and regulatory documents concerning contemporary methods for calculating solid, glulam, and cross-laminated timber beams subjected to impulsive actions, particularly concentrated impulses (impact), was carried out;
- static tests of the investigated beam specimens were performed to determine the modulus of elasticity and shear modulus;
- an experimental setup for studying the dynamic properties of timber beam elements was developed;
- a methodological approach for the experimental investigation of the dynamic properties of timber beam elements based on their response to impulsive loading was developed;
- new regularities of the behavior of solid, glulam, and cross-laminated timber beams under concentrated impulsive loading (impact) were established and their dynamic responses were compared;
- Timoshenko's theory of elastic beam vibrations accounting for shear deformation was extended to the analysis of solid, glulam, and cross-laminated timber beam elements;

- methodological approaches to the investigation of the physical and mechanical characteristics of solid, glued laminated, and cross-laminated timber were generalized;
- analytical models for predicting the dynamic response of timber beams were improved by refining the damping decrements for solid, glulam, and cross-laminated timber beams.

The thesis aims to deepen the scientific understanding of the behavior of complex engineering systems under dynamic actions. The study of multilayer timber beams subjected to impulsive loading is considered as a process of refinement and development of existing theoretical physical-mathematical models through the integration of experimental investigations, numerical modelling, and analytical generalization.

The first section presents an analysis and generalization of the current state of scientific research and international experience in the application of timber structures under dynamic loading. Particular attention is paid to the use of engineered wood products, including glued laminated timber and cross-laminated timber, in modern construction and their effectiveness under dynamic and impulsive actions. The fundamental principles governing the dynamic response of structures are examined, including the role of damping properties, mechanisms of energy dissipation, and the influence of structural and material parameters on vibration decay. Approaches to determining dynamic amplification factors and their regulatory provisions are analyzed, together with numerical modelling techniques based on the finite element method. It is established that, despite the significant body of existing research, the dynamic behavior of multilayer timber beams subjected to concentrated impulsive loading remains insufficiently studied, necessitating further experimental and theoretical investigations.

The second section presents the development and implementation of a comprehensive experimental methodology for investigating solid, glulam, and cross-laminated timber beams. The testing program included sequential static and dynamic investigations aimed at determining the stiffness and dynamic characteristics of the specimens.

During the static testing stage, the elastic properties of beams under transverse bending within the linear-elastic range were determined. Dynamic investigations were conducted using a specially designed test rig equipped with a pendulum mechanism capable of reproducing a single impulsive load and recording free vibrations. This made it possible to determine the principal dynamic parameters, including natural frequencies and damping characteristics.

Special attention was paid to ensuring experimental reliability through the standardization of specimen manufacturing conditions, improvement of support assemblies, and the use of high-precision measuring equipment. Statistical data processing methods based on Student's t-test were applied to enhance the reliability of the obtained results.

The third section presents the results of experimental investigations of the physical-mechanical and dynamic characteristics of solid timber, glued laminated timber, and cross-laminated timber beams.

According to the static test results, the modulus of elasticity and shear modulus were determined as follows: for solid timber – $E_{ST} = 7.66 \text{ GPa}$; $G_{ST} = 0.48 \text{ GPa}$; for glued laminated timber – $E_{GLT} = 7.30 \text{ GPa}$; $G_{GLT} = 0.46 \text{ GPa}$; for cross-laminated timber – $E_{CLT} = 5.88 \text{ GPa}$; $G_{CLT} = 0.37 \text{ GPa}$.

It was established that solid timber beams possess the highest stiffness, while multilayer timber materials exhibit reduced stiffness. The experimentally obtained load–deflection relationships demonstrate linear behavior, confirming the elastic performance of the material.

The investigation of dynamic behavior showed that the maximum beam displacements increase proportionally to the magnitude of the impulsive load. Spectral analysis enabled the determination of natural frequencies amounting to 75 Hz for solid timber, 73 Hz for glued laminated timber, and 67 Hz for cross-laminated timber, showing satisfactory agreement with theoretical values.

An exponential decay pattern of vibrations was identified, and the logarithmic decrement of damping was determined as follows: $\beta = 0.186$ for solid timber and $\beta =$

0.099 for both glued laminated timber and cross-laminated timber, indicating more intensive energy dissipation in solid timber.

The obtained results confirm the significant influence of timber structure on the stiffness and dynamic characteristics of beams.

The fourth section presents a comprehensive experimental-theoretical study of the behavior of solid timber, glued laminated timber, and cross-laminated timber beams under static and impulsive loading (impact).

It was established that the numerical simulation results for beam deflections obtained using the Dlubal RFEM5 software package are in good agreement with the experimental data from static tests. For 1D and 3D models of solid timber, glued laminated timber, and cross-laminated timber beams, the discrepancy does not exceed 1–3%. However, for CLT beams modelled using three-dimensional elements while preserving lamella orientation and applying a material model corresponding to solid timber, the discrepancy reaches 17%.

Analytical calculations based on the Timoshenko method demonstrated good agreement with experimental results: deviations amount to up to 7.5% for glued laminated timber, up to 11% for cross-laminated timber, and approximately 1.5% for solid timber. Numerical dynamic analysis performed using the RF-DYNAM Pro module of Dlubal RFEM5 provides conservative results with safety margins of 10% (solid timber), 18% (glued laminated timber), and 17% (cross-laminated timber).

The experimentally determined dynamic amplification factors are 0.0632 for solid timber, 0.0559 for glued laminated timber, and 0.0545 for cross-laminated timber. The theoretically calculated values obtained using a triangular approximation of the initial impulse are 0.0571, 0.0543, and 0.0476, respectively, with deviations not exceeding 13%.

The obtained results confirm the applicability of simplified analytical approaches and triangular impulse approximation for engineering calculations with sufficient accuracy.

Key words: timber, beams, solid timber, glued laminated timber, cross-laminated timber, natural vibrations, damping decrement, dynamic loading factor, impulsive loading, impact, dynamic loading, modulus of elasticity, shear modulus, physical-

mathematical modelling of composite cross-section beam, stress-strain state, numerical investigations, finite element method, analytical investigations, full-scale experimental studies, experimental setup, energy dissipation, building structures, numerical modelling.