

УДК 691.11:535.41

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300819.94.515

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДЕФОРМУВАННЯ ТА МІЦНОСТІ ДЕРЕВИНИ НА ВДАВЛЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ ГОЛОГРАФІЧНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

ШЕХОРКІНА С. Є.^{1*}, к. т. н.,

КЕСАРІЙСЬКИЙ О. Г.², к. т. н.

^{1*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 021-84-44, e-mail: S_VT@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7799-2250

² ТОВ «Лабораторія комплексних технологій», вул. Іскровська, 1-а, 51413, Павлоград, Україна, тел. +38 (095) 394-42-23, e-mail: algeo57k@gmail.com

Анотація. Постановка проблеми. Коректна оцінка несучої здатності з'єднань критично важлива для забезпечення надійності конструкції. Базовою величиною для розрахунку з'єднань дерев'яних конструкцій згідно чинних норм є характеристична міцність вдавнення з'єднувального елемента в масив деревини. Даний параметр може бути визначений за емпіричними формулами або шляхом стандартних експериментальних досліджень. Наразі існує широка база даних про результати експериментальної оцінки напружено-деформованого стану з'єднань дерев'яних конструкцій, яка охоплює визначення типу руйнування, руйнівне навантаження, міцність, залежності «навантаження–деформація» тощо. Тим не менше поєднання стандартних методів дослідження з нестандартними методиками дозволяє отримати більш детальну інформацію щодо характеру взаємодії елементів з'єднання. Реєстрація переміщень по поверхні або об'єму елемента можлива шляхом застосування методів оптичної фізики, наприклад, лазерної голографічної інтерферометрії. **Мета статті** – дослідження міцності та особливостей деформування деревини під впливом металевого нагеля із застосуванням методу лазерної голографічної інтерферометрії. **Висновки.** В результаті експериментальних досліджень отримані криві залежностей «навантаження–переміщення», руйнівні навантаження та максимальні переміщення для випробуваних зразків. На кожному етапі навантаження виконувалась реєстрація інтерферограм та отримано тривимірні графіки деформованої поверхні зразка, які наочно відображають характер та еволюцію взаємодії нагеля з деревиною. Отриманий комплекс даних щодо особливостей деформування, міцнісних характеристиках в подальших дослідженнях буде використано для розробки та верифікації розрахункової моделі болтового з'єднання дерев'яних елементів з урахуванням нелінійної роботи.

Ключові слова: з'єднання дерев'яних конструкцій; інтерферограми; міцність вдавнення; залежність «навантаження–переміщення»

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРОЧНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ НА ВДАВЛИВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

ШЕХОРКИНА С. Е.^{1*}, к. т. н.,

КЕСАРІЙСКИЙ А. Г.², к. т. н.

^{1*} Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (095) 021-84-44, e-mail: S_VT@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7799-2250

² ООО «Лаборатория комплексных технологий», ул. Искровская, 1-а, 51413, Павлоград, Украина, тел. +38 (095) 394-42-23, e-mail: algeo57k@gmail.com

Аннотация. Постановка проблемы. Корректная оценка несущей способности соединений критически важна для обеспечения надежности конструкции. Базовой величиной для расчета соединений деревянных конструкций согласно действующих норм является характеристическая прочность вдавливания соединительного элемента в массив древесины. Данный параметр может быть определен по эмпирическим формулам или путем стандартных экспериментальных исследований. На данный момент существует широкая база данных о результатах экспериментальной оценки напряженно-деформированного состояния соединений деревянных конструкций, которая охватывает определение типа разрушения, разрушающую нагрузку, прочность, зависимости «нагрузка–деформация» и т. д. Тем не менее, сочетание стандартных методов исследования с нестандартными методиками позволяет получить более детальную информацию о характере взаимодействия элементов соединения. Регистрация полей перемещений по поверхности или объему элемента возможна с применением методов оптической физики, например, лазерной голографической интерферометрии.

Цель статьи – исследование прочности и особенностей деформирования древесины под действием металлического нагеля с применением метода лазерной голографической интерферометрии. **Выводы.** В результате экспериментальных исследований получены кривые зависимостей «нагрузка–перемещение», разрушающие нагрузки и максимальные перемещения для испытываемых образцов. На каждом этапе нагружения выполнялась регистрация интерферограмм и получены трехмерные графики деформированной поверхности образца, которые наглядно отображают характер и эволюцию взаимодействия нагеля с древесиной. Полученный комплекс данных об особенностях деформирования, прочностных характеристиках в дальнейших исследованиях будет использован для разработки и верификации расчетной модели болтового соединения деревянных элементов с учетом нелинейной работы.

Ключевые слова: соединения деревянных конструкций; интерферограммы; прочность вдавливания; зависимость «нагрузка-перемещение»

INVESTIGATION THE PECULIARITIES OF DEFORMATION AND STRENGTH OF TIMBER USING LASER INTERFEROMETRY METHOD

SHEKHORKINA S.Ye.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.)*,

KESARIISKYI A.H.², *Cand. Sc. (Tech.)*

^{1*} Department of reinforced concrete and masonry structures, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 021-84-44, e-mail: S_VT@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4377-3746

² “Laboratory of Complex Technologies” Ltd, 1-A, Iskrovskaya St., 51413, Pavlohrad, Ukraine, tel. +38 (095) 394-42-23, e-mail: algeo57k@gmail.com

Abstract. Problem statement. Correct assessment of load carrying capacity of connections is crucial for ensuring the structure reliability. The initial parameter for the calculation of load carrying capacity of the timber structures connections is the characteristic embedment strength (the strength of timber massive under dowel penetration). This characteristic can be determined using empiric formulas or through standard experimental investigation. Currently a wide database on the results of the experimental assessment of stress-strain state of timber structures connections exists, which covers the questions of determination of failure patterns, failure load, strength, “load-deformation” dependences etc. Nevertheless, a combination of the standard investigation methods with non-standard techniques allows obtaining more detailed information about the interaction between elements of the connection. The registration of the displacement fields of the surface or volume of the element is possible using optical physics methods, e.g. laser holographic interferometry. **The purpose of the article** is to investigate the strength and peculiarities of the deformation of timber under the influence of metal dowel using laser holographic interferometry method. **Conclusion.** As a result of experimental investigations, load-displacement curves, failure loads and maximum displacements were obtained for the samples tested. At each loading stage, interferograms were recorded and three-dimensional graphs of the deformed surface of the sample were obtained, which clearly represent the nature and evolution of the interaction between dowel and timber. The resulting complex of data on the deformation and strength characteristics in further studies will be used to develop and verify the design model of the dowel connection of timber elements taking into account nonlinear work.

Keywords: timber structures joints; interferograms; embedment strength; «load-displacement» dependence

Постановка проблеми. Інформація щодо реального характеру роботи та коректна оцінка несучої здатності з'єднань критично важливі для забезпечення надійності та ефективності конструкції в цілому. На сьогоднішній день вимоги щодо забезпечення несучої здатності з'єднань дерев'яних конструкцій визначають чинні в Україні норми проектування [1]. Базовою величиною для розрахунку є характеристична міцність вдавнення з'єднувального елемента в масив деревини. Даний параметр може бути визначений за емпіричними формулами, що приведені в

нормах [1] або шляхом стандартних експериментальних досліджень згідно [2].

Існуючі дослідження з'єднань дерев'яних конструкцій охоплюють визначення типу руйнування, міцність, залежності «навантаження-деформація» тощо для різних порід деревини та типів з'єднувальних елементів. Так в роботі [3] представлені результати оцінки міцності вдавнення паралельно волокнам деяких м'яких та твердих порід деревини, а також досліджено взаємозалежність міцності вдавнення та міцності на стиск. Автори дослідження [4] приводять дані для

деревини сосни паралельно, перпендикулярно та під кутом до волокон. В роботі [5] експерименти виконуються відповідно до методик за різними стандартами з аналітичним порівнянням співставності отриманих даних. Автори [6] експериментальні значення міцності вдавнення та залежності «навантаження-деформація» використовують в якості вихідних параметрів для моделювання роботи деревини в зоні взаємодії з нагелем. Таким чином, наразі існує широка база даних про результати експериментальної оцінки щодо характеру взаємодії деревини та з'єднувальних елементів, а також міцнісних та деформаційних параметрів з'єднання.

Тим не менше у випадках оптимізації існуючих або розробки нових типів з'єднань необхідно враховувати фактичний характер роботи з'єднання. Застосування лише стандартних методик веде до нестачі інформації про реальний розподіл напружень в з'єднанні і характер його деформування.

Поєднання стандартних методів дослідження з нестандартними методиками необхідне для отримання більш детальної інформації про роботу з'єднання. Розуміння «внутрішньої» роботи елементів конструкції потребує застосування більш інформативних методів дослідження, що забезпечують реєстрацію напружено-деформованого стану у вигляді полів по поверхні або об'єму елемента. Для вирішення таких задач використовуються методи оптичної фізики, наприклад, голографічна інтерферометрія [7–9]. Особливістю методу є висока точність та можливість проведення вимірювань на об'єктах без спеціальної підготовки контрольованих поверхонь, а також простота інтерпретації отриманих даних. В галузі будівельних конструкцій і матеріалів голографічні методи використовуються для неруйнівного контролю технічного стану, дослідження мікро- та наноструктури тощо. Голографічні методи дозволяють візуалізувати рельєф поверхні об'єкта внаслідок деформації, розподіл внутрішніх

напружень, утворення мікротріщин, зміну модуля пружності. З огляду на це, дані експериментальних досліджень голографічними методами можуть бути використані в якості критерію верифікації скінченноелементних моделей елементів конструкцій або з'єднань.

Метод реєстрації полів переміщень засобами лазерної інтерферометрії для експериментального дослідження нагельних з'єднань дерев'яних елементів було розроблено та апробовано авторами статті в роботі [10].

Метою даної роботи є дослідження міцності та особливостей деформування деревини під впливом металевго нагеля із застосуванням методу лазерної голографічної інтерферометрії.

Методика досліджень. Для оцінки міцності та деформативності деревини в зоні взаємодії з металевим нагелем (болтом) були виконані експериментальні дослідження згідно [2] в комбінації з методом лазерної голографічної інтерферометрії, який дозволяє отримувати дані про фактичний характер взаємодії елементів з'єднання у вигляді полів переміщень по поверхні зразка (інтерферограм).

Стандартна методика випробувань полягає в наступному. Спочатку шляхом попередніх випробувань визначається очікуване максимальне навантаження $F_{max,est}$. При випробуванні величину навантаження поступово збільшують до значення $0.4 F_{max,est}$ і утримують протягом 30 с. Після цього навантаження зменшують до $0.1 F_{max,est}$ та знову утримують протягом 30 с. Далі зразок навантажують до руйнування. Вважається, що зразок зруйнований при руйнуванні деревини або при досягненні величини деформацій 5 мм. Графік навантаження зразка приведено на рисунку 1.

Програма експерименту включала випробування 4 стандартних зразків. Зразок представляв собою призму розмірами поперечного перерізу 120×30 мм, висотою 180 мм, виготовлений з деревини сосни. В кожному зразку був попередньо

висвердлений отвір діаметром 13 мм, в який вставлявся металевий болт діаметром 12 мм.

Для визначення очікуваного максимального навантаження $F_{max,est}$ на одному зразку було проведено попереднє випробування до руйнування. Отримане значення склало $F_{max,est}=19.5$ кН.

При випробуваннях вимірювалось вертикальне зміщення нагеля (болта) відносно випробуваного зразка між металевою оснасткою, яка утримує болт, та крайніми точками на рівні центральної осі болта.

Для забезпечення одночасної реєстрації інтерферограм поверхні зразка була розроблена оптична схема, загальний вигляд якої приведено на рисунку 1.

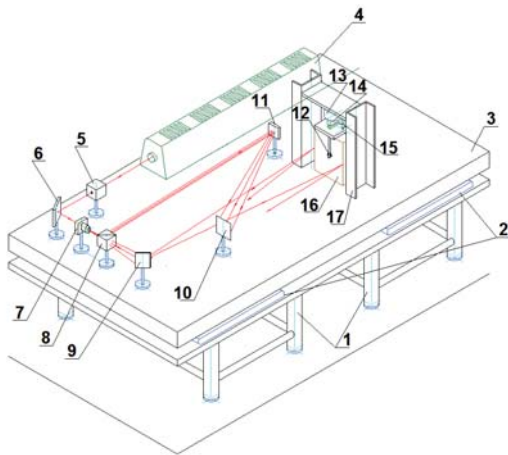


Рис. 1. Просторова схема реєстрації голографічних інтерферограм: 1 – опори голографічної установки; 2 – подушки-пневмоамортизатори; 3 – віброзахисна платформа; 4 – лазер; 5 – оптичний затвор; 6, 9, 11 – дзеркала; 7 – мікрооб'єктив; 8 – світлоподільвач; 10 – фотопластинка з тримачем; 12 – штифт з силовими штоками; 13 – гідроциліндр; 14 – датчик зусилля; 15 – датчик осевого переміщення; 16 – зразок; 17 – навантажуючий пристрій /

Fig. 1. 3D scheme of the equipment for the registration of the holographic interferograms: 1 – equipment supports; 2 – pneumodamper pads; 3 – vibroprotected platform; 4 – laser; 5 – light shutter; 6, 9, 11 – mirrors; 7 – micro lens; 8 – beam splitter; 10 – photographic plate with a holder; 12 – dowel; 13 – hydraulic cylinder; 14 – force sensor; 15 – longitudinal displacement sensor; 16 – sample; 17 – loading device

Для проведення досліджень використовувалась голографічна установка, змонтована на сталевій базовій плиті розміром $1\,300 \times 2\,400$ мм, що розміщена на

пневмоамортизаторах. В якості джерела когерентного випромінювання було використано газовий He–Ne лазер ЛГН-215, потужністю 50 мВт. Реєстрація голографічних інтерферограм проводилась з використанням фотопластин ПФГ-01, що мають розподільну здатність 2000 лин/мм та забезпечують отримання інтерферограм з дифракційною ефективністю не менше 35 %.

Для виконання експериментів було виготовлено спеціальне оснащення, яке забезпечує передачу зусилля від гідроциліндра до нагеля. Для забезпечення мінімального затінення досліджуваної поверхні, вертикальні силові штоки (поз. 3 на рис. 2) виконані з високоміцної круглої сталі малого діаметру. Передача навантаження на нагель виконувалась через напівкільцевий ложемент (поз. 2 на рис. 2) з боку досліджуваної поверхні дозволило зареєструвати поля переміщень в зоні взаємодії нагеля та деревини. Розміщення датчика переміщень (поз. 6 на рис. 2) забезпечило оптичний доступ досліджуваної поверхні, що важливо для вивчення особливостей зони деформування.

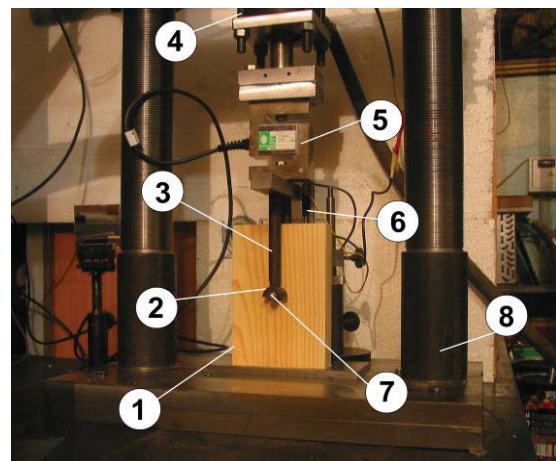


Рис. 2. Загальний вигляд зразка для випробувань на вдавлення: 1 – зразок, 2 – ложемент штифта, 3 – силовий шток, 4 – гідроциліндр, 5 – датчик зусилля, 6 – датчик осевого переміщення, 7 – нагель, 8 – навантажувальний пристрій /

Fig. 3. A general view of the sample for the embedment tests: 1 – sample, 2 – lodgment of the dowel, 3 – stock for force transfer, 4 – hydraulic cylinder, 5 – force sensor, 6 – longitudinal displacement sensor, 7 – dowel, 8 – loading equipment

Результати. В результаті випробувань були отримані криві залежностей «навантаження–переміщення» для випробуваних зразків. Характерний графік приведений на рисунку 3. На графіку чітко виявлена ділянка, яка відповідає максимальному навантаженню. За цією ділянкою слідує поступове падіння навантаження, яке супроводжується наростанням переміщень. Це пов'язано з порушенням мікроструктури деревини, формуванням та ростом тріщин під поверхнею болта, що відповідає руйнуванню зразка. Руйнування зразків відбувалося внаслідок досягнення граничних деформацій з утворенням тріщин.

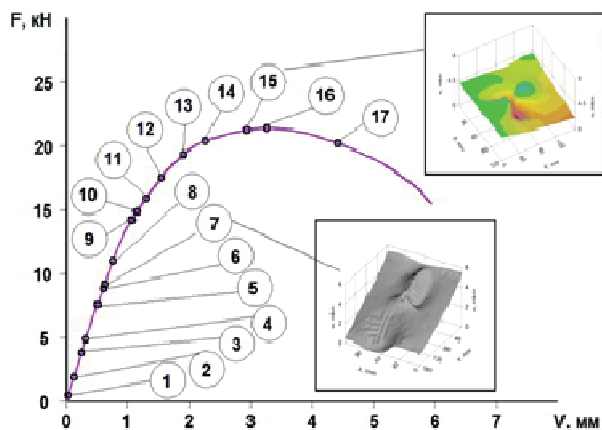


Рис. 3. Характерний графік залежності «навантаження–переміщення» та 3D-візуалізація деформованої поверхні зразка / Fig. 3. Characteristic “load–displacement” diagram and 3D-visualisation of the deformed surface of the sample

Завантаження зразка проводилось поетапно. На кожному етапі навантаження виконувалась реєстрація інтерферограм. На основі отриманих інтерферограм отримано тривимірні графіки деформованої поверхні зразка (візуалізація переміщень) (рис. 3). Отримані інтерферограми (рис. 4) наочно відображають характер та еволюцію взаємодії болта з деревиною. На стадії 1-2 йде опресування контактуючих поверхонь об'єкта дослідження. По траєкторії руху нагеля (уздовж поздовжньої осі зразка) відбувається «розпирання» дерев'яного бруса в нижній частині.

Стадії 3 та 4 відповідають перерозподілу зон деформації, формується

надійний контакт опорної поверхні зразка з нерухомою основою та починається формування зони взаємодії під нагелем. На стадіях 5 та 6 спостерігаються процеси псевдотекучесті через локальну деструкцію на мікрорівні матеріалу. Інтерферограми мають низький контраст та зони втрати зображення, що викликано відсутністю стабільності положення досліджуваної поверхні під час експонування. Протягом стадій 7–11 формується деформаційний «гребінь» уздовж вертикальної осі зразка. На стадіях 12 та 13 з'являються перші ознаки формування аномальних зон деформації зразка. Стадії 14–15 відповідають початку руйнування зразка, яке починалося з видимого сплюснення волокон деревини під поверхнею болта. На стадії 16 рівень деструкції починає позначатися на несучій здатності зразка, утворюються тріщини. По поверхні контакту йде безперервна локальна деформація, що проявляється як зона втрати інтерференційних смуг. Деформації продовжують рости, що обумовлюється порушенням макроструктури деревини та розвитком тріщин. Максимальне навантаження досягалося в межах 3...4 мм вертикального переміщення.

На основі отриманих в результаті експериментів величин руйнівного навантаження було визначено міцність вдавнення f_h [2]:

$$f_h = F_{max}/dt, \quad (1)$$

де F_{max} – максимальне навантаження, Н; d – діаметр нагеля, мм; t – товщина зразка, мм.

Для оцінки отриманих експериментальних даних міцності вдавнення було виконано порівняння з теоретичним значенням $f_{h, теор}$ за емпіричною залежністю, згідно [1]:

$$f_{h, теор} = 0.082(1 - 0.01d)\rho, \quad (2)$$

де d – діаметр нагеля, мм; $\rho = 470 \text{ кг/м}^3$ – густина деревини випробуваних зразків.

Отримані дані приведені в таблиці.

Таблиця

Результати визначення міцності вдавнення /
The results of determination of the embedment
strength

Зразок	F_{max} , кН	f_h , МПа	$f_{h, теор}$, МПа	$k_3 = 100(f_h \cdot f_{h, теор}) / f_h, \%$
0	19.5	54.2	33.9	37.4
1	14	38.9		12.8
2	21	58.3		41.8
3	20	55.5		38.9

Результати випробувань мали задовільну повторюваність. Міцність вдавнення зразків деревини в усіх випадках перевищує теоретичне значення згідно вимог проектування. Для трьох зразків міцність вдавнення становила 54,2...58,3 МПа, що на 37,4...41,8 % більше теоретично визначеної величини. Виключення становив зразок № 1, міцність якого (38,9 МПа) найбільш близька до теоретичної.

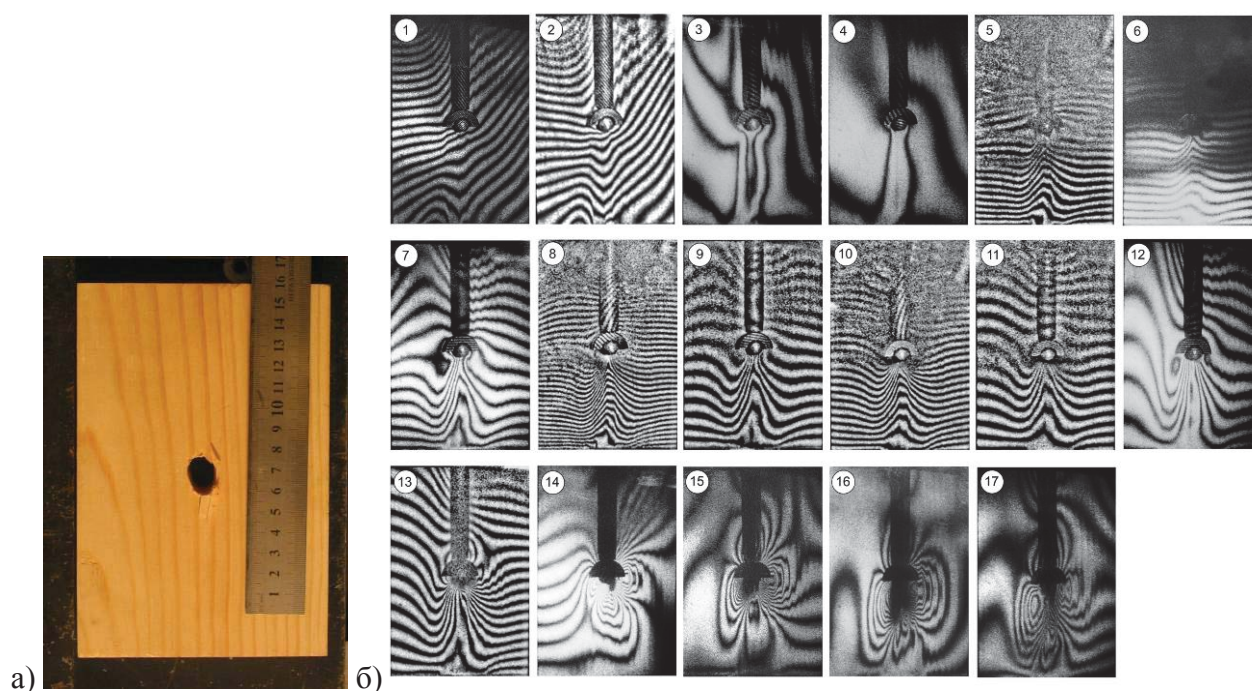


Рис. 4. Характер руйнування зразка (а) та ряд інтерферогам поверхні зразка, отриманих при поетапному навантаженні (б) / Fig. 4. The character of sample failure (a) and the row of interferograms obtained for step-by-step loading (b)

Висновки. Для оцінки міцності та деформативності деревини в зоні взаємодії з металевим нагелем (болтом) були виконані експериментальні дослідження з використанням стандартних методик в поєднанні з методом оптичної фізики (лазерної голографічної інтерферометрії).

В результаті випробувань були отримані криві залежностей «навантаження–переміщення» для випробуваних зразків. Максимальне навантаження досягалося в межах 3...4 мм вертикального переміщення. Міцність вдавнення деревини становила 54,2...58,3 МПа (для одного зразка 38,9 МПа).

На кожному етапі навантаження виконувалась реєстрація інтерферогам, які наочно відображають характер та еволюцію взаємодії болта з деревиною. На основі отриманих інтерферогам отримано тривимірні графіки деформованої поверхні зразка (візуалізація переміщень).

Отриманий комплекс даних щодо особливостей взаємодії деревини та нагеля, криві залежностей «навантаження–переміщення» та міцність вдавнення деревини в подальших дослідженнях буде використано для розробки та верифікації розрахункової моделі болтового з'єднання дерев'яних елементів з урахуванням нелінійної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення / Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. – Київ, 2017. – 111 с.
2. EN 383:2007. Timber structures. Test methods. Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners. – European Committee for Standardization (CEN). – Brussels, 2007. – 11 с.
3. Glišović I. Embedment test of wood for dowel-type fasteners / I. Glišović, B. Stevanović, T. Kočetov-Mišulić // Wood Research. – Vol. 57 (4). – 2012. – Pp. 639–650.
4. Henrique de Almeida D. H. Embedment Strength of Pinus sp. Wood to Metal Pins / Henrique de Almeida D. H. et al. // Advanced Materials Research. – Vol. 884–885. – 2014. – Pp. 653–656.
5. Molina J. C. Embedment strength of steel dowel in wood specimens according to ABNT NBR 7190:1997 and ASTM D5764: 2007 Standards. / J. C. Molina, Rodrigues de Oliveira D., M. Negreli, E. A. F. Friedmann Pallarolas // Ingeniare. Rev. chil. ing. – Vol. 25 (3). – 2017. – Pp. 492–500.
6. Cristóvão L. dos Santos Embedment strength characterization of pine wood. Numerical study of the non-linear behaviour / Cristóvão L. dos Santos, Abílio M. P. de Jesus, José J. L. Morais // Ciência & Tecnologia dos Materiais. – Vol. 27, iss. 1. – 2015. – Pp. 15–26.
7. Jones R. Holographic and Speckle Interferometry. A Discussion of the Theory, Practice and Application of the Techniques. Cambridge et al. / R. Jones, C. Wykes // Cambridge University Press. – 1983. – 342 p.
8. Голографические интерференционные методы измерения деформаций : монография / [Ю. И. Островский, В. П. Щепинов, В. В. Яковлев]. – Москва : Наука, 1988. – 248 с.
9. Александров Е. Б. Исследование поверхностных деформаций тел с помощью голограммной техники / Е. Б. Александров, А. М. Бонч-Бруевич // ЖТФ. – 1967. – Т. 37, вып. 2. – С. 360–369.
10. Savytskyi M. Investigation of nailed timber connections using the laser interferometry method / M. Savytskyi, S. Shekhorkina, A. Kesariyskyi, V. Kondrashchenko, S. Dukat // Slovak Journal of Civil Engineering. – Vol. 26 (4). – 2018. – Pp. 32–38.

REFERENCES

1. *DBN B.2.6-161:2017 Derev'yani konstrukcii. Osnovny polozhennya* [Timber structures. General aspects]. Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, Kyiv, 2017, 11 p. (in Ukrainian).
2. EN 383:2007. Timber structures. Test methods. Determination of embedding strength and foundation values for dowel type fasteners. – European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2007, 11 p.
3. Glišović I., Stevanović B. and Kočetov-Mišulić T. Embedment test of wood for dowel-type fasteners. Wood Research, vol. 57 (4), 2012, pp. 639–650.
4. Henrique de Almeida D. H. et al. Embedment Strength of Pinus sp. Wood to Metal Pins. Advanced Materials Research, vol. 884–885, 2014, pp. 653–656.
5. Molina J.C., Rodrigues de Oliveira D., Negreli M. and Friedmann Pallarolas E.A.F. Embedment strength of steel dowel in wood specimens according to ABNT NBR 7190:1997 and ASTM D5764: 2007 Standards. Ingeniare. Rev. chil. ing., vol. 25 (3), 2017, pp. 492–500.
6. Cristóvão L. dos Santos, Abílio M.P.de Jesus and José J.L.Morais. Embedment strength characterization of pine wood. Numerical study of the non-linear behaviour. Ciência & Tecnologia dos Materiais, vol. 27, iss. 1, 2015, pp. 15–26.
7. Jones R. and Wykes C. Holographic and Speckle Interferometry. A Discussion of the Theory, Practice and Application of the Techniques. Cambridge et al., Cambridge University Press, 1983, 342 p.
8. Ostrovskiy Yu., Schepinov V. and Yakovlev V. *Golograficheskie interferencionnye metody izmereniya deformatsiy* [Holographic interference methods of measuring deformations]. Moscow : Science, 1988, 248 pp. (in Russian).
9. Aleksandrov Yu. and Bonch-Bruyevich A. *Issledovanie poverhnostnykh deformatsiy tel s pomoschyu gologramnoy tekhniki* [Investigation of the surface deformations of bodies with the help of a hologram technique]. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Technical Physics]. Vol. 37, 1967, pp. 360–369 (in Russian).
10. Savytskyi M., Shekhorkina S., Kesariyskyi A., Kondrashchenko V. and Dukat S. Investigation of nailed timber connections using the laser interferometry method. Slovak Journal of Civil Engineering, vol. 26 (4), 2018, pp. 32–38.

Надійшла до редакції 18.07.2019 р.