

УДК 669.017.539.6

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА МЕТОДАМИ ДВОКРОКОВОЇ ФАЗОЗСУВНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Т. І. ВОРОНЯК

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Запропоновано методики безконтактного визначення коефіцієнта Пуассона методами фазозсувної інтерферометрії для балок з гладкими і шорсткими поверхнями та схему експериментальної установки для їх реалізації. Наведено результати апробації цих методик на сталевій та дюралевій балках.

Ключові слова: коефіцієнт Пуассона, інтерферограма поверхні, рельєф поверхні, поле переміщень поверхні.

Коефіцієнт Пуассона (КП) є важливим механічним параметром ізотропних конструкційних матеріалів і разом з модулем Юнга повністю характеризує їх пружні властивості [1]. Метод визначення КП ґрунтується на вимірюваннях відносних поздовжніх і поперечних деформацій зразка під час його поступового чи ступінчастого навантаження. Згідно з працями [2, 3], деформації вимірюють тензорезисторами, електро- або механічними тензометрами. На зразку кріплять вимірювачі деформації (давачі наклеюють за 16...24 h до випробувань) і встановлюють його на випробувальну машину. Як реєструвальну апаратуру для вимірювання деформацій застосовують осцилографи, вимірювачі статичних деформацій, потенціометри та інші прилади з чутливістю не меншою за 10^{-5} відносних одиниць деформацій [2]. Таке визначення КП є досить тривале і дороге. Тому мета цієї роботи – розробити та експериментально апробувати нові інтерферометричні методики безконтактного визначення КП зразків з гладкими і шорсткими поверхнями.

Запропоновано [4] методику визначення КП за інтерферограмами поверхні. Вона придатна для балок (пластин), що мають хоча б одну гладку поверхню. Розглядали прямокутну пластину з однорідним поперечним перерізом, що жорстко зафіксована на однакових відстанях від її центру за допомогою двох тримачів S_1 і S_2 та симетрично навантажена двома однаковими силами у точках P_1 і P_2 (рис. 1а). Таке навантаження називається чотириточковим згином і визначає такі компоненти зміщення поверхні [5]:

$$\begin{aligned} d_1 &= -[x_2^2 + \nu(t^2 - x_3^2)]/(2R_2); \\ d_2 &= Mx_1x_2/(EI); \\ d_3 &= -M\nu x_1x_2/(EI), \end{aligned} \quad (1)$$

де ν – КП; t – товщина пластини; R_2 – радіус кривизни уздовж осі x_2 ; E – модуль Юнга матеріалу пластинки; M – момент сили, що спричинює згин; I – момент інерції поперечного перерізу пластини. При цьому поверхня пластини зі сторони осі x_1 має бути гладкою (полірованою).

Якщо інтерферограму, що відповідає цій деформації, спостерігають по осі x_1 , то вона буде чутлива тільки до тих компонентів зсуву, які перпендикулярні до предметної (гладкої) площини і визначаються похідними зміщення $d_{1,2}$ і $d_{1,3}$. За

таких умов цю інтерферограму можна розглядати як схему контурів постійного зміщення в перпендикулярному до гладкої поверхні напрямку, розташованих з інтервалом $\lambda/2$, де λ – довжина хвилі світла, яке використано для отримання інтерферограми. Тобто [4]:

$$d_1 = \frac{N_1 \lambda}{2}, \quad (2)$$

де N_1 – кількість інтерференційних смуг. Якщо вираз (2) об'єднати з першим рівнянням співвідношення (1), то можна зробити висновок, що смуги утворюють два сімейства гіпербол, які описують рівнянням

$$x_2^2 - vx_3^2 = 0.$$

На рис. 1b показана інтерференційна картина, де найменший кут α між гіперболами задовольняє співвідношення [4]:

$$v = \operatorname{tg}^2(\alpha/2). \quad (3)$$

Отже, інтерферометричне спостереження деформації такого виду є методом вимірювання КП. Якщо навантаження абсолютно симетричне, то зсув відбувається в напрямку, що вказаний суцільними стрілками на рис. 1b. Іншими словами, смуги сходяться до нерухомої смуги нульового порядку, яка розташована уздовж асимптот гіпербол. Зазвичай через невеликі неточності в орієнтації систем навантаження поверхні зазнають невеликих поворотів та прекосів. Тоді виникає нахил $d_{1,3}$ і смуги переміщуються в напрямку, що вказаний штриховими стрілками (рис. 1b).

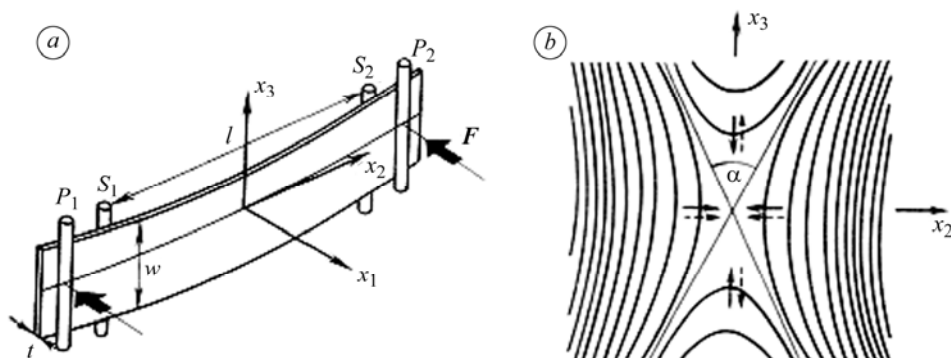


Рис. 1. Схеми чотириточкового згину (a) та інтерференційних смуг в напрямку x_1 у результаті чотириточкового згину пластини (b); F – напрям прикладання навантаження [4].

Fig. 1. Four-point bending scheme (a) and interference fringes, observed in x_1 direction as a result of the plate four-point bending (b); F – load application direction [4].

Подібне теоретичне обґрунтування методу визначення КП за інтерферограмами поверхні та приклад його експериментальної реалізації подано в праці [6]. Зокрема, якщо на відполіровану поверхню балки покласти скляну пластину, то після згину між скляною пластиною і криволінійною поверхнею балки утвориться повітряна щілина змінної товщини. Ці змінні товщини можна виміряти оптичним шляхом. Промінь монохроматичного світла (наприклад, жовтого світла натрію) перпендикулярний поверхні пластини, буде частково відбиватися пластиною, а частково – поверхнею балки. Два відбитих світлових променя інтерферують між собою в точках, де товщина повітряного прошарку така, що різниця між довжинами шляхів двох цих променів рівна непарному числу світлових півхвиль. Таким чином, отримуємо гіперболічні горизонталі (рис. 2a).

Однак запропоновано [6] знаходити інший кут α (рис. 2b), і, відповідно, інший вираз для визначення КП:

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{1}{\nu}. \quad (4)$$

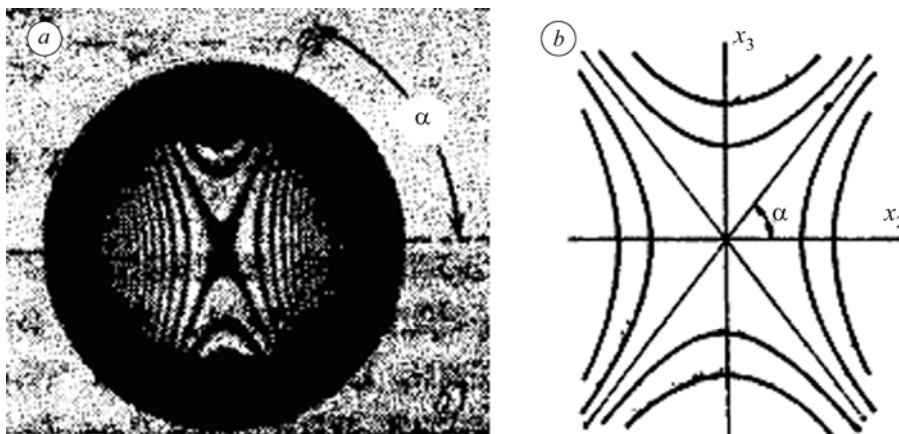


Рис. 2. Експериментально отримана інтерферограма поверхні (a) та схема визначення кута α за інтерференційними смугами (b) [6].

Fig. 2. Experimentally obtained surface interferogram (a) and scheme of α angle definition by interference fringes (b) [6].

Суть методу від цього не змінюється, але в обох випадках у рекомендаціях для знаходження кута α закладена значна похибка – до 5° . За перекосів балки під час навантаження ця похибка буде більшою ще на кілька градусів. Крім того, запропоновані [4, 6] методики не придатні для балок чи пластин, що мають лише шорсткі поверхні.

Нові методики визначення КП та експериментальна установка для їх апробації. Суть запропонованих методик полягає в тому, що для зменшення похибки знаходження кута α спочатку відтворюють рельєф або поле переміщень поверхні навантаженого зразка. З відтвореного рельєфу (для зразків з гладкою поверхнею) отримують карту його ізоліній – місць однакової кривизни поверхні. На карті вибирають ізолінії, що проходять через краї протилежних гіпербол, згідно з працею [4]. Далі знаходять кут між цими ізолініями, тобто кут α , а потім за виразом (3) розраховують КП. Щоб відтворити рельєф гладкої поверхні, використовували метод двокрокової фазозсувної інтерферометрії, який дає змогу відтворювати рельєф поверхні з похибкою у кілька нанометрів, і, відповідно, з такою ж похибкою визначити ізолінії деформаційного рельєфу [7–9]. В результаті похибка знаходження кута α була меншою за 1° .

Щоб апробувати запропоновані методики, створили експериментальну установку, що складалася з одноmodalного лазера з розширювачем променя, фазозсувного інтерферометра Тваймана–Гріна з двома затворами, пристрою навантаження балкових зразків за чотириточковою схемою (згином), динамометра з індикаторним пристроєм для контролю навантаження, відеокамери та персонального комп'ютера. Частково схема установки показана на рис. 3.

Зразки виготовляли у формі балок розміром $220 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$. Одна з граней сталевій балки розміром $220 \times 20 \text{ mm}^2$ полірувалась до шорсткості з параметром $R_z \leq 0,1 \text{ }\mu\text{m}$. Саме до цієї грані і прикладалось навантаження, що спричинило деформацію балки, і саме посередині цієї грані вибиралася ділянка розміром $20 \times 27 \text{ mm}^2$ для спостереження та реєстрації інтерферограм. Інша дюралева балка

мала всі шорсткі поверхні з параметром $R_a \geq 1 \mu\text{m}$. Ділянка спостереження для цієї балки також становила $20 \times 27 \text{ mm}^2$ і вибиралась посередині грані з розміром $220 \times 20 \text{ mm}^2$.

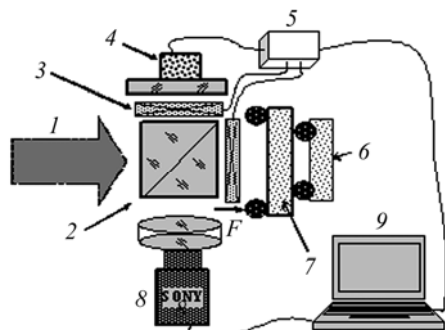


Рис. 3. Схема експериментальної установки для визначення КП інтерферометричним методом:
 1 – розширений лазерний промінь;
 2 – світлоподільник; 3 – затвори;
 4 – фазозсувний елемент; 5 – блок керування фазозсувним елементом та затворами; 6 – динамометр;
 7 – досліджувана балка; 8 – відеокамера;
 9 – комп'ютер; F – напрям прикладання навантаження.

Fig. 3. Experimental setup for Poisson's ratio determination by interferometric technique:
 1 – broadened laser beam; 2 – beam splitter; 3 – shutter; 4 – phase shifting element;
 5 – phase shifting element and shutter controller; 6 – dynamometer; 7 – studied beam;
 8 – videocamera; 9 – computer; F – load application direction.

Під час дослідження балки з гладкою поверхнею після її навантаження реєстрували дві інтерферограми поверхні, які відрізнялися зсувом фази опорного променя на довільний кут, та окремо зображення ділянки спостереження і опорного дзеркала. Інтерферограми реєстрували за відкритих затворів 3 (рис. 3): одну інтерферограму – за відсутності сигналу керування на фазозсувному елементі 4, а другу – за його подачі. Зображення ділянки спостереження і опорного дзеркала реєстрували за почергового відкривання затворів 3. Такі інтерферограми та зображення необхідні для відтворення рельєфу ділянки спостереження. Відповідні алгоритми відтворення рельєфу гладкої поверхні методом фазозсувної інтерферометрії та процедура отримання карти ізоліній детально описані в працях [7–9].

Щоб визначити КП балок з шорсткими поверхнями, використовували іншу, хоча в дечому подібну методику. Для того, щоб отримати поле переміщення шорсткої поверхні, необхідно щонайменше чотири інтерферограми, які за шорстких поверхонь мають назву спекл-інтерферограми (СІ). Дві СІ, які також різняться між собою зсувом фази опорного променя на довільний кут, реєструють за попереднього навантаження зразка, а дві – за так званого різницевого. Щоб отримати такі СІ в експериментальній установці (рис. 3), затвори можна або видалити, або залишити постійно відкритими, а дзеркало фазозсувного елемента бажано замінити пластиною з шорсткою поверхнею. Якщо порівняти дві СІ, що відповідають різним навантаженим станам шорсткої поверхні, то попільсьово віднявши їх, отримуємо різницеву СІ, яка подібна до інтерферограми гладкої деформованої поверхні.

Відповідні алгоритми відтворення поля переміщень шорсткої поверхні методом двокрокової фазозсувної спекл-інтерферометрії детально описані в працях [10, 11]. Отримавши поле переміщень поверхні шорсткої балки, визначають КП так, як і для балок з гладкими поверхнями.

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 4 показані інтерферограми поверхні полірованої балки, виготовленої зі сталі 38ХНЗМА, за різного навантаження. Як бачимо, за допомогою інтерферограм можна контролювати наявність перекосів балки під час її навантаження. Ці перекося можна усувати або враховувати, адже вони впливатимуть на точність визначення КП.

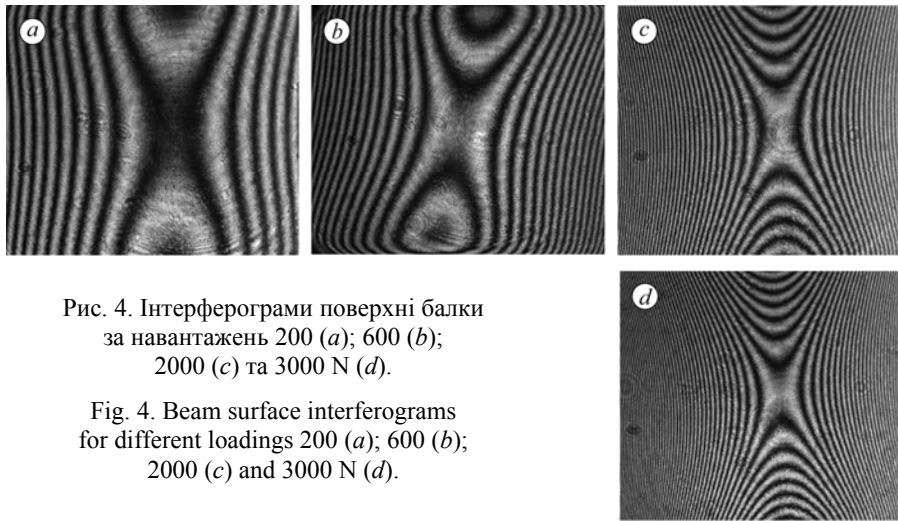


Рис. 4. Інтерферограми поверхні балки за навантажень 200 (а); 600 (b); 2000 (с) та 3000 N (d).

Fig. 4. Beam surface interferograms for different loadings 200 (a); 600 (b); 2000 (c) and 3000 N (d).

Наведені (рис. 5) результати обробки інтерферограм поверхні сталеві балки за навантаження до 1000 N, знайдено кут $\alpha = 54^\circ$ і відповідно визначено $\nu = 0,261$.

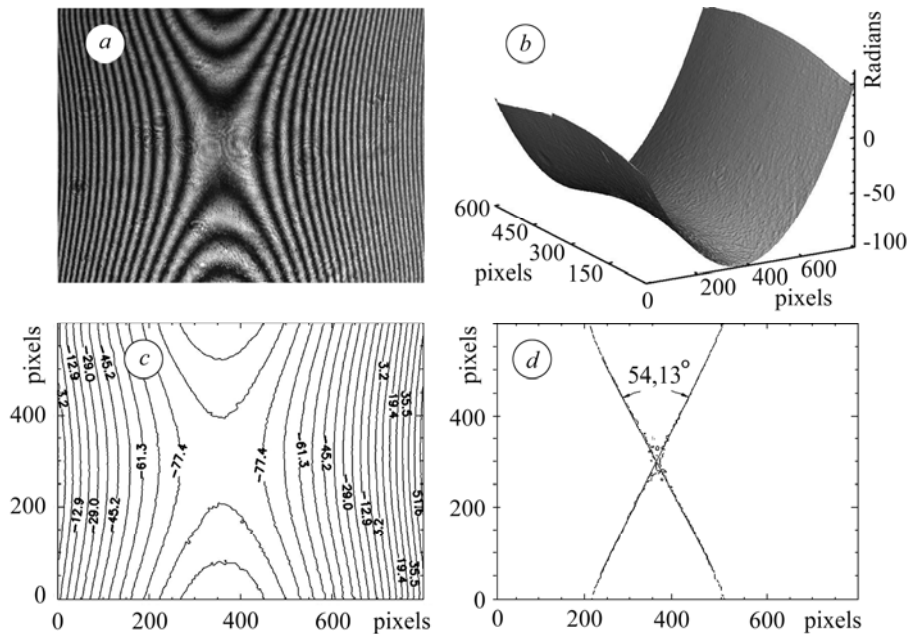


Рис. 5. Результати обробки інтерферограм для балкового зразка зі сталі 38ХНЗМА за навантаження 1000 N: а – одна з інтерферограм; б – відновлений рельєф поверхні; с – карта ізоліній; d – визначений кут між виділеними ізолініями.

Fig. 5. Results of interferograms processing for a 38ХНЗМА steel beam specimen under 1000 N loading: a – one of the interferograms; b – recovered surface relief; c – isoline map; d – determined angle between marked isolines.

КП для полірованої балки визначався за навантажень 200, 300, 600, 1000, 1500, 2000, 2500 та 3000 N. Для кожного навантаження експериментальні дані знімали двічі. Перший раз під час збільшення навантаження, і другий – під час його зменшення. Навантаження контролювалось з похибкою ± 5 N. В обох випадках для кожного навантаження значення ν практично збігалось (в межах похибки експерименту), що свідчило про те, що деформації балки у всьому діапазоні навантажень були пружні.

Проміжні результати обробки СІ балки з шорсткими поверхнями, виготовленої з алюмінієвого сплаву Д16, показані на рис. 6. Формат кадру під час реєстрації СІ, як і формат кадру інтерферограм, становив 800×600 пікселів. За попереднього навантаження балки до 2060 N та різницевого 40 N знайдено кут $\alpha = 59^\circ$ і відповідно визначено $\nu = 0,320$. Отримані безконтактним інтерферометричним методом КП для сталеві та дюралевої балки збігаються з довідковими даними.

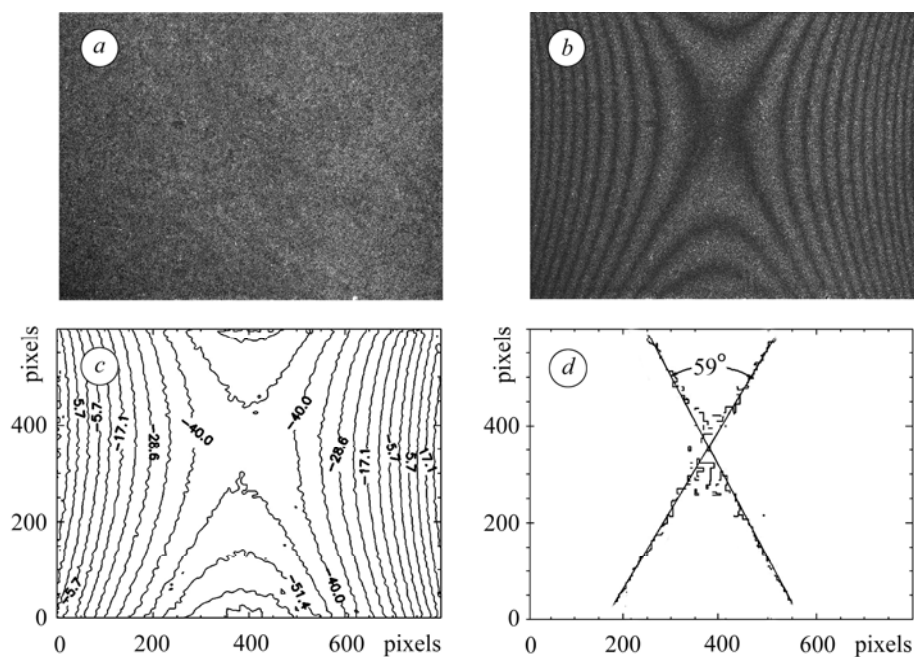


Рис. 6. Результати обробки спекл-інтерферограм для балкового зразка з алюмінієвого сплаву Д16 за попереднього навантаження 2060 N та різницевого 40 N: *a* – одна із СІ; *b* – різницева СІ; *c* – карта ізоліній поля переміщень поверхні; *d* – визначений кут між виділеними ізолініями.

Fig. 6. Results of speckle-interferograms processing for a beam duralumin Д16 specimen with 2060 N preloading and 40 N difference loading: *a* – one of the speckle-interferograms; *b* – difference speckle-interferogram; *c* – surface displacement field isoline map; *d* – determined angle between marked isolines.

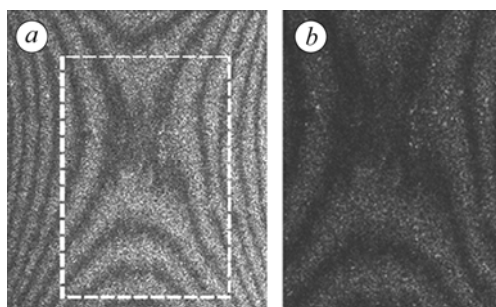


Рис. 7. Різницева спекл-інтерферограма всієї ділянки спостереження за появи пластичних деформацій (*a*) та ділянка з локальними пластичними деформаціями (*b*).

Fig. 7. Difference speckle-interferogram of the whole observation area during plastic deformations appearance (*a*) and the area with local plastic deformations (*b*).

За навантаження дюралевої балки до 2500 N в середині ділянки спостереження почали виникати пластичні деформації. Їх появу виявили спочатку за допомогою різницевої СІ (рис. 7), а згодом і за показами динамометра. Пластичні деформації ще є незначними, але на картині різницевої смуг проявляються дуже виразно у вигляді різких перепадів кривизни та навіть розривів смуг. Таким чином, форма смуг на різницевій спекл-інтерферограмі шорсткої чи інтерферограмі

гладкої поверхонь може бути індикатором того, що досліджують в пружній зоні або вже за пластичних, чи навіть локальних пластичних деформацій. Бо відомо, що визначення КП за пластичних деформацій беззмістовне.

ВИСНОВКИ

Запропоновано методики безконтактного визначення коефіцієнта Пуассона методами фазозсувної інтерферометрії для балок з гладкими і шорсткими поверхнями та схему експериментальної установки для їх реалізації. Експериментальна апробація цих методик на сталевій та дюралевій балках підтвердила їх ефективність та достовірність отриманих результатів. Вперше показано, що за інтерферограмами поверхонь можна не тільки визначати коефіцієнт Пуассона балкових зразків, а й контролювати появу на їх поверхні пластичних деформацій.

РЕЗЮМЕ. Предложено методики безконтактного определения коэффициента Пуассона методами фазосдвигающей интерферометрии для балок с гладкими и шероховатыми поверхностями и схему экспериментальной установки для их реализации. Приведены результаты апробации этих методик на стальной и дюралевой балках.

SUMMARY. The method for non-contact Poisson's ratio determination by the phase-shifting interferometric technique for beams with smooth and rough surfaces and the experimental setup scheme for its realization are proposed. Results of the proposed techniques approbation on the steel and duralumin beams are presented.

1. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
2. ГОСТ 25.602-80. Расчеты и испытания на прочность. – Введ. в экпл. 01.07.81.
3. ASTM E 132-04. Standard Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature. – Current edition approved 01.04.2004.
4. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
5. Sokolnikoff J. S. Mathematical Theory of Elasticity, 2nd edition. – New York: McGraw Hill, 1956. – P.100–107.
6. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
7. Вороняк Т., Кметь А., Муравський Л. Дослідження мікрорельєфу поверхні твердого тіла та її переміщень за методом фазозсувної інтерферометрії // Механіка руйнування матеріалів та міцність конструкцій / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 377–382.
8. Визначення розміру втомної зони передруйнування методом фазозсувної інтерферометрії / О. П. Остащ, Л. І. Муравський Т. І. Вороняк та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – 46, № 6. – С. 61–67.
(Ostash O. P., Muravs'kyi L. I., Voronyak T. I. et al. Determination of the size of the fatigue prefracture zone by the method of phase-shifting interferometry // Materials Science. – 2011. – 46, № 6. – P. 781–788.)
9. Two-frame phase-shifting interferometry for retrieval of smooth surface and its displacements / L. I. Muravsky, O. P. Ostash, A. B. Kmet' et al. // Optics and Lasers in Engng. – 2011. – 49, № 3. – P. 305–312.
10. Вороняк Т. І., Кметь А. Б., Личак О. В. Фазозсувна спекл-інтерферометрія з одноразовим зсувом фази // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – 43, № 4. – С. 93–102.
(Voronyak T. I., Kmet' A. B., and Lychak O. V. Single-step phase-shifting speckle interferometry // Materials Science. – 2007. – 43, № 4. – P. 554–567.)
11. Вороняк Т. І., Кметь А. Б., Муравський Л. І. Визначення 3D полів переміщень за методом фазозсувної спекл-інтерферометрії // Там же. – 2009. – 45, № 3. – С. 43–48.
(Voronyak T. I., Kmet' A. B., and Muravs'kyi L. I. Determination of the 3D fields of displacements by the method of phase-shifting speckle interferometry // Materials Science. – 2009. – 45, № 3. – P. 372–377.)

Одержано 08.04.2013