

ВСТАНОВЛЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ СТІНКИ ПАЛИВНОГО БАКА РАКЕТИ-НОСІЯ ОПТИКО-ЦИФРОВИМ МЕТОДОМ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ¹, О. П. МАКСИМЕНКО¹, Ю. В. МОЛЬКОВ¹,
Д. В. КЛИМЕНКО², Ю. Ю. ВАРИВОДА³, О. Н. КУЗЬ⁴

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Конструкторське бюро "Південне", Дніпро;

³ Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій ім. С. З. Гжицького;

⁴ Національний університет "Львівська політехніка"

Розроблено методику і оптико-цифрову систему для безконтактного вимірювання переміщень і деформацій стінки паливного бака ракети-носія. Запропоновану методику вимірювання та обладнання апробовано під час його сертифікаційних випробувань. Визначено напружено-деформований стан стінки паливного бака за встановленими на контрольованій ділянці полями деформацій. Порівняно результати безконтактного вимірювання деформацій з тензометричними і одержано добру їх збіжність. Показано перспективність оптико-цифрових методів вимірювань та подано рекомендації щодо практичного використання розробленої методики.

Ключові слова: цифрова кореляція зображень, оптико-цифрова система, розподіл деформацій, локальна деформація, паливний бак, ракета-носії.

Згідно з методикою ресурсних випробувань паливних баків ракет-носіїв, необхідно оцінити напружено-деформований стан у стінці за ступеневого навантаження та отримані результати зіставити із розрахунком.

За програмою випробувань інструментальними методами визначають деформації у стінці бака у встановлених місцях. Для вимірювань традиційно використовують тензоперетворювачі з відповідним обладнанням для ресстрації електричних сигналів. Тензометрія забезпечує необхідну точність і достовірність результатів, проте деформації поверхні фіксують в окремих точках і для їх встановлення, враховуючи великі розміри паливного бака, необхідна значна кількість тензоперетворювачів. Недоліком тензометрії є також контакт тензоперетворювачів з досліджуваною поверхнею матеріалу, необхідність захисту від впливу зовнішнього середовища та температури. Тому актуальним є розроблення нових безконтактних оптико-цифрових систем (ОЦС), які дають можливість отримати просторовий розподіл та зміну переміщень і деформацій поверхні паливного бака за його навантаження.

Відомо, що для безконтактного визначення розподілу деформацій на поверхні великогабаритних конструкцій та елементів ракетно-космічної техніки застосовують методи фотограмметрії та цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) [1–3], які дозволяють дистанційно визначати поля переміщень на ділянці поверхні конструкції з малими похибками. Також метод ЦКЗ використовують під час тривалого моніторингу елементів великогабаритних конструкцій [4]. Завдяки простому апаратурному забезпеченню, безконтактності і широкому діапазону вимірювань ОЦС широко використовують для вирішення багатьох практичних задач діагностики конструкцій і виробів. Однак в кожному конкретному випадку застосування

ОЦС для отримання достовірних результатів із прийнятною похибкою вимірювання необхідно розробляти спеціальну методику досліджень із врахуванням характеристик об'єкта контролю, схеми навантаження, параметрів апаратури і очікуваного діапазону вимірюваних значень.

Для застосування ОЦС на практиці необхідно розробити нові алгоритми обробки зображень, здатних визначати розподіли деформацій і переміщень поверхні об'єкта за допомогою однієї відеокамери. Ця задача особливо актуальна під час випробовування великогабаритних об'єктів для одночасного контролю деформацій поверхні в багатьох місцях та переміщення об'єкта контролю, тобто визначення переміщення контрольованої ділянки в просторі.

Мета роботи – розробити та апробувати методику безконтактного вимірювання переміщень і деформацій поверхні паливного бака ракети-носія за сертифікаційних випробувань за допомогою простої ОЦС з однією відеокамерою та визначити напружено-деформований стан стінки паливного бака за отриманими розподілами деформацій.

Відома низка підходів, коли за допомогою однієї відеокамери, отримують розподіли деформацій поверхні в трьох напрямках. Для цього використовують властивості частотного спектра крос-кореляційного сигналу двох лазерних спекл-зображень [5]. Однак такий спосіб має малий діапазон вимірювання і дуже чутливий до шумів зображення, зміщення та повороту об'єкта контролю. В іншому підході для встановлення відносних геометричних трансформацій зображень використовують статистичні характеристики розподілу їх інтенсивності (моменти нульового, першого і другого порядків) [6]. Проте точність визначення геометричних трансформацій зображень за такого підходу невисока, середні значення похибок встановлення зміни масштабу в межах ($\leq 20\%$), кута ($\leq 30^\circ$) і зміщення ($\leq 10\%$) становлять $6 \cdot 10^{-3}$, $0,35^\circ$ і $0,4$ пікселя відповідно [7].

З меншими обчислюваними затратами і більшою точністю можна оцінити геометричні трансформації зображень, використавши швидке перетворення Фур'є (ШПФ) та інваріантне перетворення Фур'є–Меліна (ПФМ) [8, 9] і подавши зображення у частотній площині. Підхід на основі ПФМ добре зарекомендував себе в системах виявлення і розпізнавання об'єктів, відокремлення повороту, переміщення і зміни масштабу зображень [10]. Слід відзначити, що це перетворення легко адаптується до алгоритму ЦКЗ, оскільки під час його реалізації використовують ШПФ і частотну площину для крос-кореляції зображень.

Обладнання та методика визначення розподілу деформацій стінки паливного бака. Відповідно до програми випробувань виміряли переміщення поверхні паливного бака дистанційно за допомогою розробленої ОЦС з використанням модифікованого алгоритму ЦКЗ. Деформації стінки бака розраховували за отриманими переміщеннями на ділянці розміром 200×150 mm, розташованій біля тензоперетворювача А4.1. Перед вимірюванням на досліджуваній ділянці за допомогою білої і чорної фарб сформований випадковий малюнок. Для реєстрації зображень використовували відеокамеру Tourcam UCMOS 10000KPA з об'єктивом Xenoplan 1.7/17, закріплену на вертикальній стійці поруч з паливним баком разом з освітлювачем (рис. 1). Відстань від передньої лінзи об'єктива відеокамери до контрольованої поверхні становила $0,57$ m. Для забезпечення достатнього контрасту зображень область контролю 2 підсвічували світлодіодним джерелом світла 5. Схема вимірювань наведена на рис. 2.

Щоб виявити зміни у деформаційному полі на контрольованій ділянці бака 2, за допомогою відеокамери реєстрували зображення на кожному етапі його навантаження. Зареєстровані цифрові зображення передавали кабелем у персональний комп'ютер, де вони накопичувались на жорсткому диску. Розподіли переміщень і деформацій визначали після завершення всіх ступенів навантаження бака. Спо-

чатку шляхом кореляційного порівняння фрагментів зареєстрованих зображень визначали відносні поля переміщень у межах контрольованої ділянки поверхні. Далі за встановленими полями переміщень розраховували поля деформацій, використовуючи розроблені алгоритми і програмні засоби [11, 12]. Під час розрахунків за вихідний стан прийняли заповнення бака на 40% його об'єму, при цьому зареєстровано перше зображення № 1. Відносно нього розраховували зміни в переміщеннях і деформацію у стінці бака, які зумовлені зміною навантаження. Наприклад, розподіл деформацій або переміщень, отриманий з використанням зображення № 21, відповідає змінам, які відбулися з поверхнею паливного бака від часу реєстрації першого зображення до моменту часу реєстрації зображення № 21.

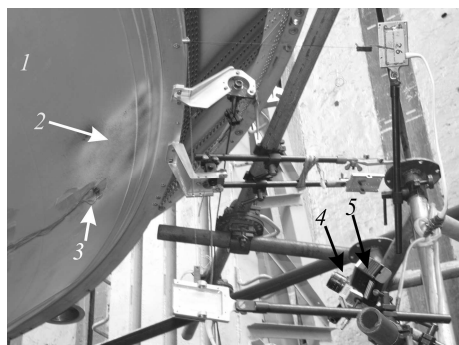


Рис. 1. ОПС на стійці біля паливного бака: 1 – паливний бак; 2 – контрольована ділянка; 3 – тензоперетворювач; 4 – відеокамера; 5 – світлодіодний освітлювач.

Fig. 1. An optical-digital system (ODS) is attached on the stand near the fuel tank: 1 – fuel tank; 2 – control area; 3 – strain gauge; 4 – video camera; 5 – LED illuminator.

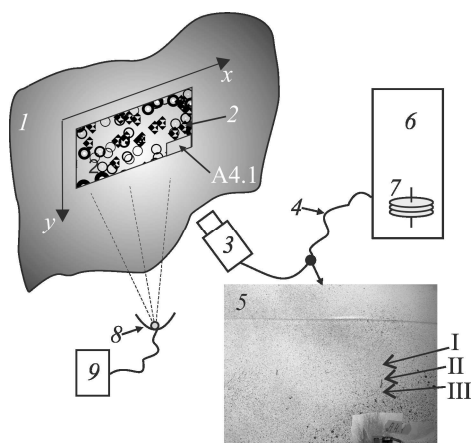


Рис. 2. Блок-схема вимірювання: 1 – поверхня паливного бака; 2 – контрольована ділянка з випадковим малюнком; 3 – відеокамера з об'єктивом; 4 – кабель USB; 5 – зображення поверхні об'єкта, захоплене відеокамерою; 6 – персональний комп'ютер; 7 – жорсткий диск; 8 – світлодіодний освітлювач; 9 – акумулятор; I, II, III – точки на поверхні бака, де визначали локальні деформації; A4.1 – тензоперетворювач.

Fig. 2. Block diagram of measurement: 1 – surface of the fuel tank; 2 – controlled area with a random pattern; 3 – video camera with lens; 4 – USB cable; 5 – image of the object surface captured by the video camera; 6 – personal computer; 7 – hard drive; 8 – LED illuminator; 9 – accumulator; I, II, III – points on the surface of the tank, where the local deformation was determined; A4.1 – strain gauge.

Враховуючи умови закріплення та силову схему навантаження паливного бака і аналіз зареєстрованих зображень, встановили, що під час випробувань разом з деформаціями поверхні змінюється геометрія бака та його розташування у просторі. Система реєстрації зображень зафіксована нерухомо на стійці, тому неконтрольовані зміщення бака викликають геометричні трансформації зображень (зміни масштабу, зміщення і відносні повороти), які під час обробки методом ЦКЗ перетворюються у хибні деформації поверхні. Відносні повороти зображень перетворюються у додаткові зсувні деформації поверхні, а зміна масштабу додає постійну радіальну деформацію направлену від центра зображення до краю. За абсолютною величиною ці додаткові деформації прямо пропорційні геометричним трансформаціям зображень і можуть суттєво спотворити дійсний розподіл

деформацій стінки бака. Для встановлення дійсних деформацій спочатку виконували корекцію геометричних спотворень зображень, викликаних просторовим переміщенням контрольованої ділянки поверхні бака.

На основі ПФМ розроблено алгоритм визначення переміщень ділянки поверхні бака відносно відеокамери. Він дозволяє визначити геометричні трансформації зображень внаслідок переміщень об'єкта контролю, зокрема, зміну масштабу, лінійне зміщення і відносні повороти зображень. Детально цей алгоритм і оцінка його похибок подані у праці [9], де показано, що для реальних зображень розміром 2000×2000 пікселів залишкові похибки визначення зміни масштабу в межах 0,5% становлять $\leq 10^{-3}$, а відносного повороту в діапазоні $\pm 5^\circ$ не більше $0,01^\circ$. Використовуючи розроблений алгоритм і програмні засоби, здійснили відповідну корекцію зареєстрованих зображень перед визначенням полів деформацій стінки бака і цим зменшили вплив неконтрольованих переміщень паливного бака на точність вимірювань.

Результати вимірювань. Зареєстровані цифрові зображення обробляли програмними засобами на основі алгоритму ЦКЗ і ПФМ [9, 11, 12]. В результаті отримали поля переміщень стінки паливного бака в області контролю за різного навантаження з просторовою дискретністю $(0,6 \times 0,6 \pm 0,01)$ mm. Використовуючи поля переміщень, розраховували зміни деформацій стінки бака з дискретністю $(2 \times 2 \pm 0,1)$ mm. Характерні приклади отриманих полів деформацій для двох станів навантаження, які відповідають зареєстрованим зображенням № 21 і № 29, показані на рис. 3. Абсолютна похибка визначення переміщень не перевищувала ± 1 μ m, а відносна похибка розрахованих деформацій $< 0,01\%$.

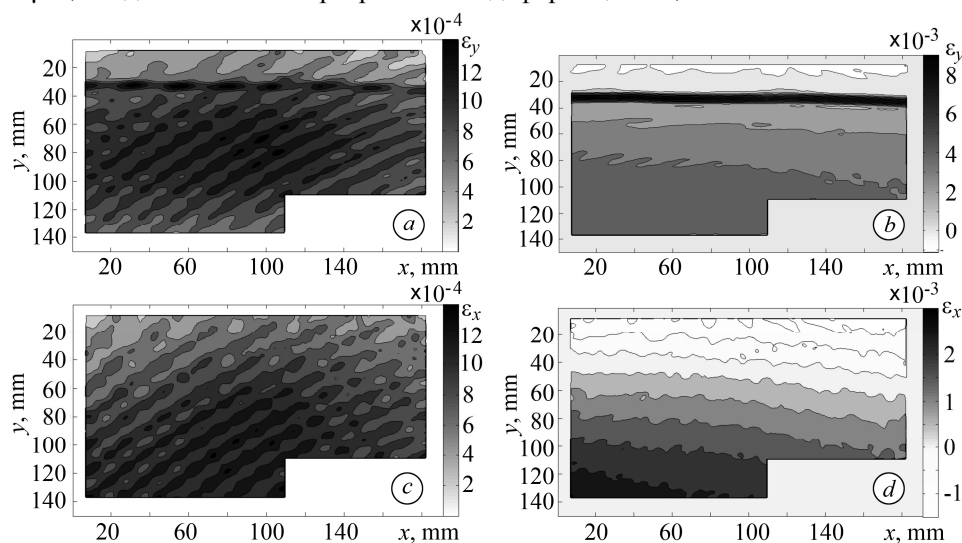


Рис. 3. Вертикальні ϵ_y (a, b) і горизонтальні ϵ_x (c, d) поля деформацій стінки бака, одержані для зображень № 21 (a, c) і № 29 (b, d).

Fig. 3. Vertical ϵ_y (a, b) and horizontal ϵ_x (c, d) deformation fields of the tank walls, obtained for images № 21 (a, c) and № 29 (b, d).

Для зіставлення значень деформацій, отриманих ОЦС, з деформаціями, вимірюваними тензометричним способом, обчислили локальні вертикальні деформації стінки бака в точках I, II і III (рис. 4). Ці точки розташовані над прикріпленням до стінки бака тензодавачем А4.1 (див. рис. 2). На рис. 4 по осі абсцис зазначено номер зареєстрованого зображення, а по осі ординат – зміну деформацій стінки паливного бака відносно стану, зафіксованого першим зображенням. Стрілками позначені зображення № 21 і № 29, для яких розраховані поля деформацій на рис. 3.

Використовуючи зареєстровані під час експерименту зображення та розроблений алгоритм на основі ПФМ, визначили просторові переміщення досліджуваної ділянки бака щодо відеокамери (рис. 5). Значення переміщень контрольованої ділянки в напрямку D слід розглядати як оціночні, оскільки їх отримали розрахунковим шляхом за зміною масштабу зображень на основі спрощеної моделі оптичної системи і попередньо встановленої залежності між відстанню і масштабом. Відносна похибка визначення позовжніх переміщень D за оцінками не перевищувала 0,1% [9].

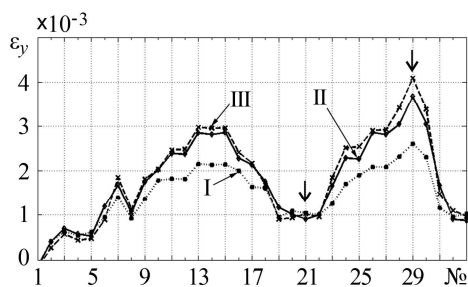


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Зміна локальних деформацій поверхні бака під час випробувань ϵ_y у точках I, II, III.

Fig. 4. Change of local deformations of the tank surface during testing ϵ_y at points I, II, III.

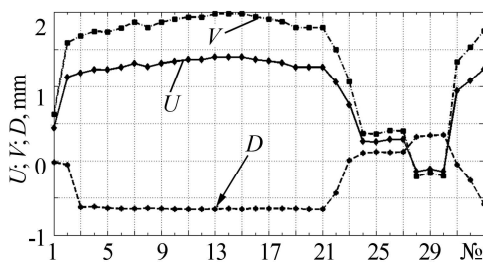


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Переміщення контрольованої ділянки поверхні паливного бака: U і V – поперечні переміщення; D – позовжні переміщення в напрямку відеокамери.

Fig. 5. Displacement of controlled area of the fuel tank: U and V – transversal displacements; D – longitudinal movement in the direction of the video camera.

Для визначення напружено-деформованого стану у стінці бака, який виготовлено зі сплаву АМГ-6, використовували результати досліджень [13–15]. Згідно з ними, на основі побудованих повних рівноважних діаграм для сплаву АМГ-6 визначили напруження за апроксимаційною залежністю

$$S(e) = 598 \cdot e^{0,21},$$

де S – істинні напруження; e – істинна деформація.

Порівняння розрахункових деформацій і напружень у стінці бака з результатами, отриманими за навантаження бака з використанням ОЦС, показує збіжність у межах 10%.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику безконтактного вимірювання переміщень, яка дає можливість з високою точністю визначати поля деформацій в околі конструктивних концентраторів напружень, а також оцінювати напружено-деформований стан паливного бака.

РЕЗЮМЕ. Разработано методику и оптико-цифровую систему для бесконтактного измерения перемещений и деформаций стенки топливного бака ракеты-носителя. Предложенную методику измерения и оборудование апробировано во время его сертификационных испытаний. Определено напряженно-деформированное состояние стенки топливного бака за установленными на контролируемом участке полями деформаций. При сравнении результатов бесконтактного измерения деформаций и тензометрических получено их хорошее согласование. Показано перспективность оптико-цифровых методов измерений и даны рекомендации по практическому использованию разработанной методики.

SUMMARY. The method and opto-digital system for contactless measurement of displacements and deformations of the fuel tank wall of the launch vehicle have been developed. The

proposed measurement methodology and equipment have been tested during their certification tests. The stress-strain state of the fuel tank wall is determined for the deformation fields installed on the controlled area. The results of contactless measurement of deformations with strain gauges are compared and their good convergence is obtained. The prospect of optic-digital measurement methods is shown and recommendations are given regarding the practical use of the developed methodology.

1. *Photogrammetry* measurements during a tanking test on the space shuttle external tank, ET-137C.E / J. Littell, T. Schmidt, J. Tyson, S. Oliver, M. Melis, C. Ruggeri, D. Revilock // Proc. Annual Conf. on Experimental and Applied Mechanics (Costa Mesa, June 11–14 2012): Experimental and Applied Mechanics. – Costa Mesa, 2012. – **4**. – P. 111–123.
2. *Three-dimensional* digital image correlation of a composite overwrap pressure vessel during hydrostatic pressure tests / D. M. Revilock, J. C. Thesken, T. E. Schmidt, B. S. Forsythe // NASA Center for Aerospace Information. – 2007. – NASA TM 2007-214938.
3. *Strain analysis* of pressure vessels contained pits based on digital image correlation method / W. Xu, X. Feng, J. Li, X. Shi, T. Bai // Proc. of SPIE. – 2016. – 9903. – P. 990310-1–990310-7.
4. *Improved* plant availability by advanced condition based inspections / H. J. M. Hulshof, J. W. Noteboom, P. G. M. Welberga, L. E. Bruijn // Int. J. of Pressure Vessels and Piping. – 2004. – **81**. – P. 491–497.
5. *Fricke-Begemann T.* Three-dimensional deformation field measurement with digital speckle correlation // Applied Optics. – 2003. – **42**, № 34. – P. 6783–6796.
6. *Liao S. X. and Pawlak M.* On image analysis by moments // IEEE trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1996. – **18**, № 3. – P. 254–266.
7. *Мясников Е. В.* Определение параметров геометрических трансформаций для совмещения портретных изображений // Компьютерная оптика. – 2007. – **31**, № 3. – С. 77–82.
8. *Chen Q., Defrise M., and Deconinck E.* Symmetric phase-only matched filtering of fourier-mellin transforms for image registration and recognition // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1994. – **16**, № 12. – P. 1156–1168.
9. *Maksymenko O. P., Sakharuk O. M.* Improving the reliability of 2D DIC by using Fourier-Mellin transform // Digital image correlation advanced methods and applications / Ed.: David Chambers. – New York, 2017. – P. 1–36.
10. *Zokai S. and Wolberg G.* Image registration using log-polar mappings for recovery of large-scale similarity and projective transformations // IEEE Transact. on Image Proc. – 2005. – **14**, № 10. – P. 1422–1434.
11. *Оптико-цифровий* метод визначення полів деформацій на локальних ділянках залізобетонних мостів / Я. Л. Іваницький, О. П. Максименко, Р. М. Запоточний, Ю. В. Мольков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 2. – С. 104–108.
(*Optical-digital* method for the determination of strain fields in local areas of reinforced-concrete bridges / Ya. L. Ivanyts'kyi, O. P. Maksymenko, R. M. Zapotochnyi, Yu. V. Mol'kov // Materials Science. – 2015. – **51**, № 2. – P. 261–266.)
12. *Максименко О. П., Франкевич Л. Ф., Сахарук О. М.* Алгоритм обробки цифрових зображень для визначення деформаційних характеристик матеріалів // Електроніка та інформ. технології. – 2013. – Вип. 3. – С. 156–168.
13. *Мольков Ю. В.* Оцінювання опірності руйнуванню ємностей під тиском із використанням енергетичного підходу: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львів, 2014. – 20 с.
14. *Image* segmentation based on the evaluation of the tendency of image elements to from cleysters with the help of point field characteristics / R. Kosarevych, B. Rusyn, V. Korniy, and T. Kerod // Cylernetics and Systems Analysis. – 2015. – **51**, № 5. – P. 704–713.
15. *Комп'ютерний* аналіз характерних елементів фактографічних зображень / Р. Я. Косаревич, О. З. Студент, Л. М. Свірська, Б. П. Русин, Г. М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 4. – С. 53–60.
(*Computer* analysis of characteristic elements of fractographic images / R. Ya. Kosarevych, O. Z. Student, L. M. Svirska, B. P. Rusyn, H. M. Nykyforchyn // Materials Science. – 2013. – **48**, № 4. – P. 474–481.)

Одержано 19.04.2018