

1 – нова плетть трубопровода; 2 – експлуатуємоий трубопровод

Рис. 2. Розподілення значень коєрцитивної сили  $H_c^{св.с.}$  для кільцевих сварних з'єднань участків трубопровода на різних етапах експлуатації

Сравнительный анализ полученных результатов – величин средних значений коєрцитивных сил  $H_c^{св.с.}$  и  $H_c^{III}$  в сварных соединениях обследованного участка трубопровода и исследованных образцов позволяет определять состояние сварных соединений трубопровода и, таким образом, определить появление зон микроповреждений и деформаций материала. Разработанная методика анализа результатов измерений с учетом меры рассеивания значений величин коєрцитивных сил  $H_c^{св.с.}$  и  $H_c^{III}$  (отклонение их от средних значений) в сварных соединениях эксплуатируемого трубопровода позволит на основе графика распределения значения коєрцитивной силы  $H_c^{св.с.}$  (рис. 2) оценить характер изменения

состояния каждого сварного соединения участка трубопровода после длительной эксплуатации. Анализ исследований показал, что полученные результаты испытаний кольцевых сварных соединений участка трубопровода с помощью магнитного коєрцитиметрического метода удовлетворительно коррелируют с результатами других методов неразрушающего контроля и обеспечивают достоверной информацией о состоянии микроструктуры материала сварных соединений трубопровода после длительного срока эксплуатации.

1. Патон Б.Е. *Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций* "Автоматическая сварка", № 9-10, 2000. – С. 3-9.
2. Черняев К.В., Васин Е.С. *Обеспечение безопасной эксплуатации и продления срока службы магистральных трубопроводов* "Автоматическая сварка", № 9-10, 2000. – С. 167-170.
3. Дворецкий В.И. *Оценка остаточного ресурса сварных несущих конструкций и продление срока службы* "Автоматическая сварка", №9-10, 2000. – С. 37-41.
4. Лобанов Л.М., Бондаренко А.Ю., Бондаренко Ю.К. *Оценка сварных соединений конструкций магнитным (коєрцитиметрическим) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса* "Техническая диагностика и неразрушающий контроль", № 1, 2004. – С. 15-17.
5. Бондаренко Ю.К., Фурман Я.М., Бондаренко А.Ю., Ковальчук О.В. *Проблемы определения ресурса сварных конструкций (Обзор)*. "Автоматическая сварка", № 1, 2005. – С. 14-19.

УДК 669.017.539.6

## КОНТРОЛЬ ПОВЕРХНЕВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ТА ДЕФЕКТІВ ЗРАЗКІВ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДАМИ ЕЛЕКТРОННОЇ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

© Вороняк Т.І., Муравський Л.І., 2006

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

**Описані схеми експериментальної установки для контролю поверхневих переміщень зразків конструкційних матеріалів методами електронної спекл-інтерферометрії. Наведено приклад обробки та аналізу отриманих експериментальних результатів**

Електронна спекл-інтерферометрія (ЕСІ) є перспективним напрямом прецизійного неруйнівного контролю переміщень та деформацій поверхні, що використовуються при дослідженні механічної стійкості зразків конструкційних матеріалів в статичних та динамічних режимах їх

навантаження [1,2,3]. Одна з основних переваг ЕСІ полягає у можливості досліджувати оптично шорсткі (неполіровані) поверхні та здійснювати контроль їх деформованого стану у масштабі часу, що близький до реального. Крім того, контроль методами ЕСІ поверхневих деформацій зразків

конструкційних матеріалів та елементів конструкцій під дією зовнішніх навантажень дозволяє виявляти поверхневі і приповерхневі дефекти та оцінювати якість нанесених захисних і відновлювальних покриттів [1,3,4,5].

Для реалізації ЕСІ слід сформувати та порівняти спекл-інтерферограми (СІ) оптично шорсткої поверхні за різних станів її деформації. Найчастіше використовують СІ двох станів поверхні – початкового стану та стану, деформованого відносно початкового, причому яскравості СІ  $S_1$  в кожній точці ділянки поверхні при початковому стані деформації та  $S_2$  в кожній точці ділянки поверхні при її деформованому стані відносно початкового описуються виразами [6]:

$$\begin{cases} S_1 = i_1 + i_2 + 2\sqrt{i_1 i_2} \cos(\psi), \\ S_2 = i_1 + i_2 + 2\sqrt{i_1 i_2} \cos(\psi + \varphi), \end{cases} \quad (1)$$

де  $i_1, i_2$  – інтенсивності когерентних променів, що інтерферують в даній точці;  $\psi$  – різниця фаз між даними променями;  $\varphi$  – наведена різниця фаз між цими променями, що викликана переміщенням досліджуваної поверхні. За отриманими фазограмами (ФГ), які відповідають розподілу по поверхні ділянки спостереження наведеної різниці фаз  $\varphi$  будують поля переміщень чи деформацій поверхні, використовуючи для цього статистичний (різницевий) чи фазозсувний методи [6]. Для отримання СІ використовують кілька різних схем, за якими складається оптична частина спекл-інтерферометрів. Під час досліджень поперечних (тангенціальних) переміщень поверхні використовують схему двопроменевого інтерферометра (інша назва – інтерферометр Ліндерця), а для поздовжніх (нормальних) – схеми інтерферометрів Маха – Цендера, Майкельсона [7] та інші схеми. Слід зауважити, що в даному випадку терміни-назви “поперечні” та “поздовжні” переміщення пов’язані з напрямком спостереження, тобто переміщення вздовж напрямку спостереження – поздовжні, і, відповідно, впоперек до напрямку спостереження – поперечні.

На рис. 1 показана схема експериментальної установки, яку використовували для дослідження поперечних переміщень. Зразки конструкційних матеріалів у формі балки розмірами 220×20×10 мм навантажували за чотириточковою схемою, тобто згинаючи зразки (рис. 2). Промінь від лазера 1 (рис. 1) розширювали відповідно до розмірів ділянки поверхні, яку досліджували (рис. 2). Світлоподільник 3 ділить цей промінь на два, а дзеркала 4, 5 направляють ці промені на досліджувану поверхню 7 під однаковим кутом  $\theta$ , де вони інтерферують між собою. СІ поверхні реєстрували за допомогою відеокамери 6 та комп’ютера 10.

Величину механічного навантаження

контролювали за допомогою спеціальних тензодавачів та індикаторного пристрою 9. Розміри ділянки спостереження  $a \times b$  (рис. 2) становили 30×20 мм відповідно.

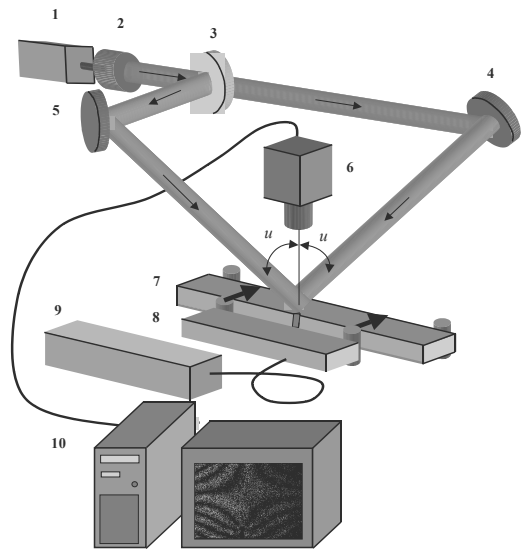
Як відомо [6], наведена різниця фаз  $\varphi$  для поперечних переміщень пов’язана з переміщенням поверхні  $\Delta l$  та умовами експерименту. Причому

$$\varphi = \frac{4\pi\Delta l \sin \theta}{\lambda}, \quad (2)$$

де  $\theta$  – кут, під яким промені падають на поверхню зразка;  $\lambda$  – довжина хвилі лазерного випромінювання. На різницевих ФГ поверхні, наведених на рис. 3, кожній смужі відповідає переміщення поверхні, рівне

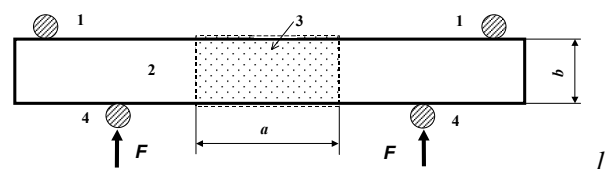
$$\Delta l_1 = \lambda / 2 \sin \theta, \quad (3)$$

яке називають чутливістю спекл-інтерферометра.



1-лазер; 2 - розширювач лазерного променя; 3 – світлоподільник; 4, 5 - поворотні дзеркала; 6 – відеокамера; 7 - досліджуваний зразок; 8 - навантажувальна установка; 9 – пристрій для контролю величини навантаження; 10 - комп’ютер; → - напрям прикладання навантаження

Рис. 1. Схема експериментальної установки для дослідження поперечних переміщень



1 – нерухомі опори, 2 – досліджуваний зразок, 3 – ділянка спостереження, 4 – опори, через які передається навантаження  $F$ ,  $a \times b$  – розміри ділянки спостереження

Рис. 2. Схема навантаження зразків

На рис. 3 показані СІ поверхні металевого балкового зразка (матеріал – Ст. 20, посередині зразка внизу – півкруглий виріз з діаметром 10 мм) та різниці ФГ, що відповідають переміщенню даної поверхні за величини навантаження зразка  $F=100$  Н. Через те, що інтерферометр чутливий лише по одній координаті, то для отримання двовірних полів поперечних переміщень необхідно паралельно одночасно використовувати дві однакові оптичні схеми, аналогічні тій, що наведена на рис. 1. Ці схеми розташовували так, щоб сформувати СІ, чутливі у взаємно перпендикулярних напрямках. Для кожного з інтерферометрів може

використовуватись як окреме джерело когерентного випромінювання, так і одне спільне (за наявності потужного лазера та необхідної кількості світлоподільників [2]). Але при цьому для реєстрації СІ найдоцільніше використовувати лише одну відеокамеру (за такої умови гарантується однаковий масштаб для обох інтерферометрів), а реєстрація СІ за чутливості по кожній з координат проводиться послідовно. На рис. 3,а показана різниця ФГ за чутливості інтерферометра вздовж зразка, на рис. 3,б – різниця ФГ за чутливості впоперек зразка, а на рис. 3,в – СІ ділянки спостереження без обробки.

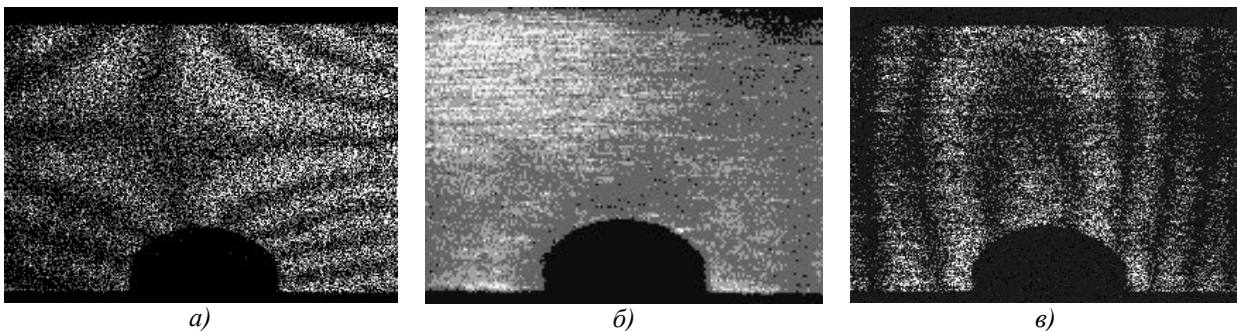


Рис. 3. СІ та ФГ поверхні досліджуваного зразка на ділянці  $30 \times 20$  мм

При розшифруванні даних картин величина переміщення поверхні  $\Delta l_n$  між довільними точками ділянки спостереження визначається за виразом

$$\Delta l_n = n\lambda / 2 \sin \theta, \quad (4)$$

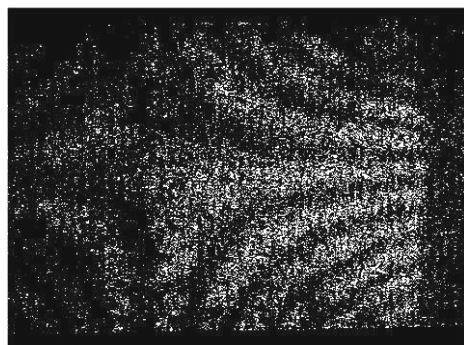
де  $n$  - кількість смуг між даними точками в напрямку чутливості інтерферометра. Для знаходження реальної віддалі  $l_n$  між цими точками використовували вираз:

$$l_n = m_n \cdot \Delta / \beta, \quad (5)$$

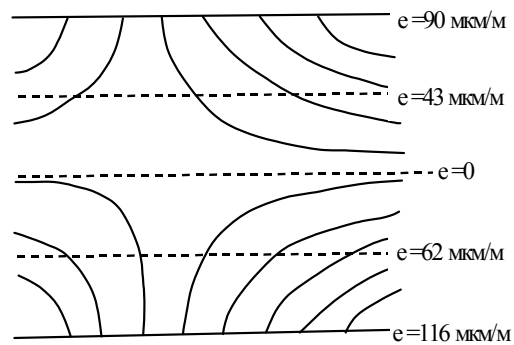
де  $m_n$  - кількість пікселів між даними точками;  $\Delta$  - розмір пік села;  $\beta$  - масштабний коефіцієнт, або коефіцієнт лінійного збільшення об'єктива відеокамери. Знаючи  $\Delta l_n$  та  $l_n$ , можна визначити величину деформації  $\varepsilon_n$ :

$$\varepsilon_n = \Delta l_n / l_n. \quad (6)$$

На рис. 4 показано результат розшифрування різниці ФГ за чутливості інтерферометра вздовж зразка (Ст. 20,  $F=100$  Н).



а)

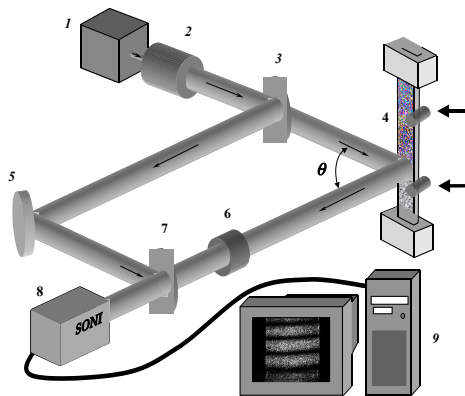


б)

Рис. 4. Різниця ФГ а) та результат її розшифрування б) (пунктирні лінії відповідають місцям однакової деформації  $\varepsilon$  поверхні)

Для дослідження поздовжніх переміщень використовували експериментальну установку, схема якої наведена на рис. 5. Оптична частина

установки зібрана за схемою інтерферометра Маха-Цендера. Для навантаження зразків використовували таку ж схему, що і на рис. 2.



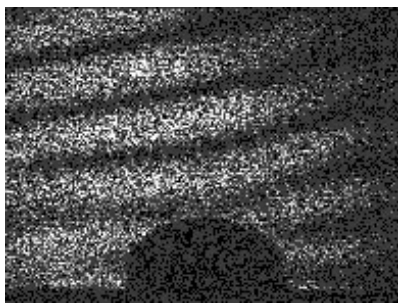
1 - лазер; 2 - розширювач лазерного променя; 3, 7 - світлоподільники; 4 - досліджуваний зразок; 5 - поворотне дзеркало; 6 - об'єктив; 8 - відеокамера; 9 - комп'ютер; → - напрям прикладання навантаження

Рис. 5. Схема експериментальної установки для дослідження поздовжніх переміщень

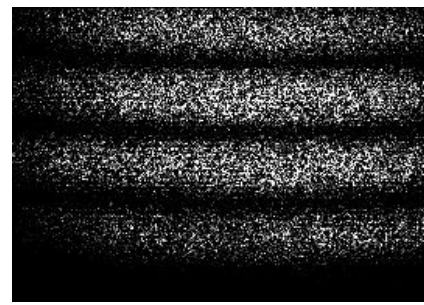
Чутливість (переміщення на одну смугу) такого спекл-інтерферометра (рис. 5) визначали за виразом [6]:

$$\Delta l'_1 = \lambda / (1 + \cos \theta). \quad (7)$$

На рис. 6 показані різниці ФГ, що відповідають поздовжнім переміщенням поверхні



а)



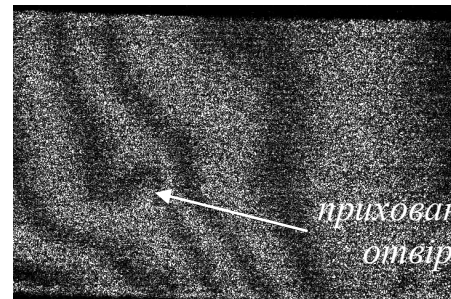
б)

а) - зразок з вирізом; б) - зразок без вирізу

Рис. 6. Різниці ФГ, що відповідають поздовжнім переміщенням поверхні за невеликих навантажень



а)



б)

а) - зразок з концентратором напружень; б) - зразок з прихованим отвором  $\varnothing 3,5 \times 8$  мм

Рис. 7. Різниці ФГ, що відповідають поздовжнім переміщенням поверхні за величини попереднього навантаження  $F=2000$  Н

зразків конструкційних матеріалів при невеликих навантаженнях ( $F=100$  Н).

Під час зростання величини навантаження характер (геометрія) смуги на різницевих ФГ, що відповідають поперечним переміщенням, змінюється незначно (зростає лише їх густина). Зате характер смуги на різницевих ФГ, що відповідають поздовжнім переміщенням, із зростанням навантаження змінюється суттєво. Це продемонстровано на рис. 7. На рис. 7,а показано різницеву ФГ зразка з вирізом, а на рис. 7,б - ФГ сталевго зразка з прихованим циліндричним отвором  $\varnothing 3,5 \times 8$  мм, який був розташований під досліджуваною поверхнею на глибині 2 мм.

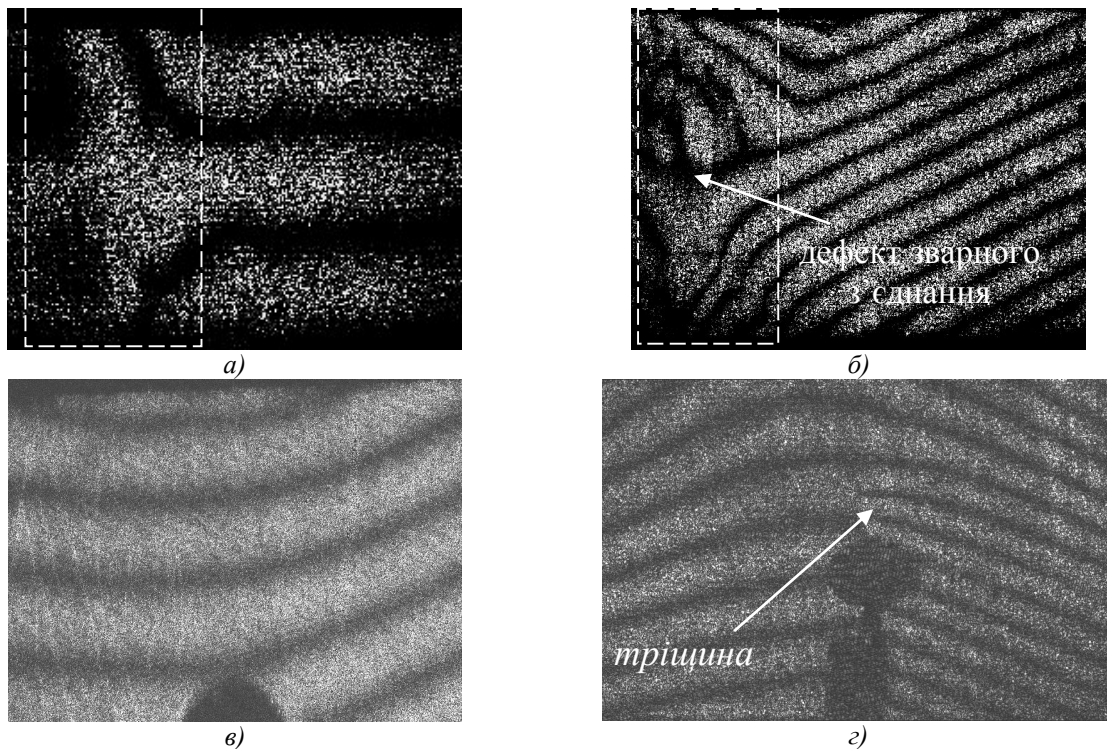
Необхідно зауважити, що у більшості випадків поверхневі і приповерхневі дефекти важко виявити методами ЕСІ за малих величин навантаження зразка. Тобто, спочатку необхідно попередньо навантажити досліджуваний зразок, а вже потім починати спостереження за його поверхнею, поступово збільшуючи при цьому величину навантаження [6]. Величина попереднього навантаження залежить як від характеру зразка, так і від схеми навантаження. У нашому випадку величина попереднього навантаження складала 100...2000 Н і наростала від спостереження до спостереження на 50...100 Н.

Щодо виявлення дефектів методами СІ, то тут необхідно нагадати, що кожна смуга на різницевих ФГ – геометричне місце точок з однаковою наведеною фазою  $\varphi$  (1) або з однаковим переміщенням досліджуваної поверхні. Якщо в деякому місці смуга змінює свою геометрію, то це пов'язано із зміною поведінки переміщення поверхні в даному місці, що, як правило, пов'язано з локальною неоднорідністю механічних властивостей зразка або наявністю у ньому дефектів. Крім того, як показали результати попередніх експериментальних досліджень, дефекти, що знаходяться під досліджуваною поверхнею, викликають лише локальну зміну геометрії різницевих смуг (рис. 7,б), в той час коли для поверхневих дефектів у місці їх знаходження спостерігається розрив смуг (рис. 8,б,г) [5].

Таким чином, аналізуючи різницеві ФГ, що відповідають поздовжнім переміщенням поверхні досліджуваного зразка, можна виявляти наявність та місце розташування дефектів, а також класифікувати їх на поверхневі та підповерхневі. При цьому можна використовувати як механічне, так і температурне навантаження зразків [1,3,5].

Наведені результати експериментальних

досліджень мають в основному якісний характер. Навіть результат розшифрування, що наведений на рис. 4,б, є доволі наближеним, оскільки похибка визначення величини переміщення може складати півширину смуги (в нашому випадку  $\pm 0,15$  мкм). Якщо ж необхідно проводити більш детальний аналіз виявлених дефектів, наприклад, наскільки змінюється розмір дефекту із зміною навантаження зразка, то слід застосовувати фазозсувні методи (ФЗМ) ЕСІ [8,9]. Для реалізації таких методів оптичні схеми спекл-інтерферометрів (рис. 1 та 5) необхідно доповнити фазозсувними елементами та використовувати фазозсувні алгоритми для обробки СІ. Фазозсувні елементи призначені для зміни фази одного з інтерференційних променів на заданий кут, оскільки для обробки СІ фазозсувними алгоритмами необхідно мати не дві СІ (в початковому та навантаженому станах), а цілий комплекс - від 4 до 8 і більше, тобто 2...4 і більше в початковому стані та 2...4 і більше у навантаженому (в залежності від того, який фазозсувний алгоритм використовується). Ці СІ для кожного із станів відрізняються лише відомим зсувом фази між інтерференційними променями.



а) – у місці якісного зварного з'єднання сталевих балок (матеріал балок Ст. 20 та Ст. 45); б) - у місці неякісного зварного з'єднання; в) – алюмінієвого зразка з концентратором напружень; г) - алюмінієвого зразка з концентратором напружень та тріщиною. Пунктирною лінією виділено місце зварювання, стрілками вказано місця знаходження дефектів

Рис. 8. Різницева СІ поздовжніх переміщень у місцях зварних з'єднань та тріщини

ФЗМ ЕСІ є значно складнішим за різницевий, але, використовуючи його, можна контролювати поля переміщень з похибкою порядку одиниць нанометрів. На даний час цей метод також використовували для досліджень поперечних і поздовжніх переміщень поверхонь зразків конструкційних матеріалів. Слід однак додати, що використання ФЗМ для контролю поверхні досліджуваних зразків під дією температурного або динамічного навантаження є досить проблематичним.

1. Л.М.Лобанов, В.А.Пивторак, В.В.Савицький, Н.Г.Кувшинский. Диагностика конструкций из металлических и композиционных материалов с применением голографии, электронной спекл-интерферометрии и широгрaфии // Автоматическая сварка. – 2000, №9-10.– С.76-83.  
 2. А.А.Апальков, И.Н.Одинцев, И.А.Разумовский. Применение электронной спекл-интерферометрии для измерения остаточных напряжений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов – 2002, Т.68, №4. - С.48-51.  
 3. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Олійник О.М. Неруйнівний контроль якості та визначення залишкових напружень елементів і вузлів конструкцій з використанням методів голографії, електронної спекл-інтерферометрії та широгрaфії // Машинознавство. – 2002, №1. – С.3-6.  
 4. Л.М.Лобанов, В.А.Пивторак, В.В.Савицький, Г.И.Ткачук. Методика определения остаточных напряжений в сварочных соединениях и

элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии // Автоматическая сварка. – 2006, №1.– С.25-30.  
 5. Т.І.Вороняк, Л.І.Муравський, Г.І.Гаськевич. Використання різницевої електронної спекл-інтерферометрії для неруйнівного контролю захисних і відновлювальних покривів//Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – Львів, 2005, Вип. 8. – С. 145—150.  
 6. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. - М.: Мир, 1986. - 328 с. ФЗМ ЕСІ є значно складнішим за різницевий, але, використовуючи його, можна контролювати поля переміщень з похибкою порядку одиниць нанометрів. На даний час цей метод також використовували для досліджень поперечних і поздовжніх переміщень поверхонь зразків конструкційних матеріалів. Слід однак додати, що використання ФЗМ для контролю поверхні досліджуваних зразків під дією температурного або динамічного навантаження є досить проблематичним.  
 7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.:Наука, 1970.— 856с.  
 8. В.И.Смоляк, А.Л.Тхорук, Т.И.Вороняк, О.Т.Олейник. Использование методов спекл-интерферометрии для изучения продольных смещений поверхностей металлических балочных образцов // Оптический журнал.-2004, Т.71, №7.- С.58-61.  
 9. Y. Surrel. Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping // Applied optics. – 1996, Vol. 35, №1. – P. 51-60.