

## МОНІТОРИНГ СТАНУ ЛАКОФАРБОВОГО ПОКРИТТЯ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЇ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Л. І. МУРАВСЬКИЙ, І. М. ЗІНЬ, Л. М. БІЛИЙ,  
Г. І. ГАСЬКЕВИЧ, О. Д. СУРЯДОВА

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

Методом цифрової спекл-інтерферометрії досліджено вплив рідкого агресивного середовища на поліуретанове лакофарбове покриття (ЛФП). Створено експериментальну установку на базі інтерферометра Тваймана–Гріна для його корозійного моніторингу шляхом реєстрації та подальшого оброблення різницевих картин спекл-інтерферограм (СІ) поверхні покриття під дією 3%-го розчину NaCl упродовж 7; 14 і 21 days. Виявлено, що за різницевиими картинами СІ можна оцінювати часові зміни деформованої поверхні ЛФП та швидкість росту корозійних дефектів і відшарувань.

**Ключові слова:** *поліуретанове лакофарбове покриття, корозійний моніторинг, цифрова спекл-інтерферометрія, рідке агресивне середовище, спекл-інтерферограма, корозійні дефекти та відшарування.*

The influence of liquid aggressive medium on a polyurethane paint coating (PC) by the electronic speckle pattern interferometry technique was studied. An experimental setup based on the Twyman–Green interferometer for corrosion monitoring of the PC was created. This setup was used for recording and subsequent processing the difference patterns of speckle interferograms (SI) of the coating surface during the action of 3% NaCl solution on it for 7; 14 and 21 days. It was shown that difference patterns of SI can be used to estimate the temporal changes in the deformed state of the PC surface and the growth rate of corrosion defects and delaminations.

**Keywords:** *polyurethane paint coating, corrosion monitoring, digital speckle pattern interferometry, liquid corrosive medium, speckle interferogram, corrosion defects and delaminations.*

**Вступ.** Лакофарбові покриття (ЛФП) часто застосовують для захисту від корозії металевих і металокомпозитних матеріалів та елементів конструкцій. Вони підвищують зносотривкість та поверхневу твердість виробів, унеможливають пошкодження робочих поверхонь внаслідок зношування, корозії, ерозії та кавітації. Тому актуальні їх неруйнівний контроль та технічна діагностика, зокрема, розроблення ефективних методів і засобів моніторингу еволюції поверхні ЛФП під дією агресивних середовищ.

Оптико-цифрові методи і засоби аналізу динамічних спекл-зображень (СЗ) та цифрової спекл-інтерферометрії (ЦСІ) перспективні для дослідження часових змін поверхні ЛФП. Розроблено низку способів аналізу динамічних СЗ, за допомогою яких вивчено часові зміни властивостей лакофарбових плівок і шарів під час висихання [1–4]. Досліджено [1, 2] їх еволюцію методом динамічної спекл-інтерферометрії (СІ). Брюн та ін. [3, 4] запропонували метод адаптивної СІ, який полягає в зміні швидкості реєстрації СЗ залежно від швидкості висихання шару фарби на підкладці. Проте, незважаючи на досить просту технічну реалізацію, можливості таких методів обмежені через неспроможність визначати часові зміни полів деформацій ЛФП.

Розроблено декілька методів ЦСІ дослідження часових змін поверхні тонких шарів фарби або ЛФП. Гуссенс та ін. [5] методом кореляційної (різницевої) ЦСІ визначали рівень набухання плівки фарби, нанесеної на підкладку із нержавної сталі, внаслідок абсорбції водяної пари. Зміну її товщини контролювали за кореляційними смугами, тобто різницевими спекл-інтерферограмами (РСІ). Переміщення поверхні визначали вздовж заданого профілю. Коефіцієнт дифузії води у фарбі – за зміною товщини плівки фарби. Якісно оцінили ступінь деформування поверхні ЛФП, виникнення блістерів та розвиток відшарувань від підкладки шляхом візуального аналізу РСІ раніше [6, 7]. Методами ЦСІ [8, 9] вивчали відшарування у захисних і відновлювальних покриттях, а кореляційної ЦСІ – мікро- і нановідшарування покриттів від підкладки за механічного навантаження або теплового збудження.

Тому метод кореляційної ЦСІ використовуватимемо для аналізу еволюції поверхні і появи відшарувань у ЛФП, що дасть змогу контролювати еволюцію полів нормальних переміщень і деформацій поверхні ЛФП на сталевій підкладці та розміри корозійних дефектів і відшарувань під час дії на поверхню рідкого агресивного середовища (РАС).

**Експериментальна установка та методика випроб.** Для неруйнівного контролю еволюції поверхні поліуретанового ЛФП під дією РАС, яким слугував 3%-й розчин NaCl, вибрали схему інтерферометра Тваймана–Гріна, чутливу лише до нормальних (від площини) переміщень поверхні (рис. 1).

Рис. 1. Схема експериментальної установки на базі інтерферометра Тваймана–Гріна: 1 – лазер; 2 – пристрій просторової фільтрації, розширення та колімації лазерного променя; 3 і 5 – поворотні дзеркала; 4 – світлоподільник; 6 – діафрагма; 7 – кругла мензурка без дна, наповнена РАС; 8 – сталевая пластинка з ЛФП; 9 – пластинка без покриття; 10 – об'єктив; 11 – цифрова камера; 12 – комп'ютер.

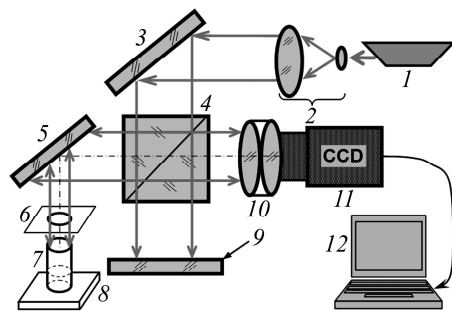


Fig. 1. Scheme of experimental installation based on Twyman–Green interferometer: 1 – laser; 2 – device for spatial filtering, expansion and collimation of the laser beam; 3 and 5 – rotating mirrors; 4 – light divider; 6 – diaphragm; 7 – round beaker without bottom filled with liquid corrosive medium (LCM); 8 – steel plate with paint coating surface (PCS); 9 – plate with a rough surface; 10 – lens; 11 – digital camera; 12 – computer.

Установку змонтували на інтерференційному столі СИН-1. Як джерело когерентного випромінювання використовували гелійнеоновий лазер ЛГН-215 з довжиною хвилі випромінювання  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ . Розширений і колімований лазерний пучок подавали на світлоподільник 4 із входною апертурою  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ , де його ділили на два перпендикулярні пучки: перший подавали на поверхню ЛФП, а другий – на пластину 9 зі шорсткою поверхнею. Відбиті предметний і опорний промені поверталися назад через світлоподільник та інтерферували між собою. Після їх проходження крізь об'єктив ЮПІТЕР-37А (фокусна віддаль  $f = 135 \text{ mm}$ , діафрагмове число  $f_{\#} = 3,5$ ) у площині розташування матричного детектора цифрової ПЗЗ-камери 11 (розмір ПЗЗ-матриці 1/2 дюйма, просторове розділення  $1280 \times 960 \text{ pixels}$ ) формували СІ.

До поліуретанового ЛФП на сталевій підкладці кріпили круглі пластмасові мензурки без дна для його постійного контакту з РАС. Внутрішній діаметр мензурок 15 mm, висота 4...6 см. Діаметр пучка значно перевищував діаметр мензурки

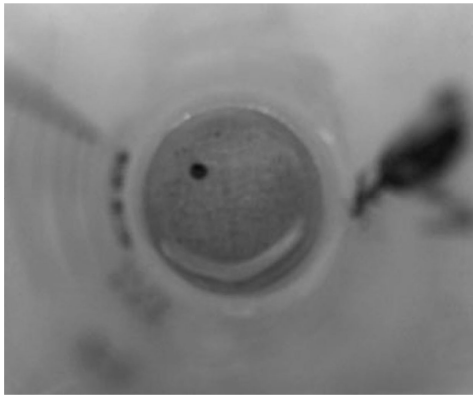


Рис. 2. Ділянка поверхні поліуретанового ЛФП на дні мензурки до початку дії РАС.

Fig. 2. The area of the polyurethane PCS at the bottom of the beaker before the LCM action.

для забезпечення рівномірного освітлення, оскільки розподіл інтенсивності світла в лазерному пучку гауссоподібний (рис. 2). Наскрізним просвердлюванням до сталеві пластини створювали штучний дефект  $\varnothing 1$  mm.

Під час юстування оптичної схеми об'єкт дослідження виставляли так, щоб його поверхня на дні мензурки була строго перпендикулярна до напрямку предметного променя інтерферометра Тваймана–Гріна, який падав на об'єкт. Пластину зі шорсткою поверхнею 9 ставили в опорне плече інтерферометра замість дзеркала, причому її шорсткість вибирали сумірною зі шорсткістю поверхні ЛФП. У цьому випадку характеристики опорного і предметного променів

майже такі ж, як відбитого і розсіяного у підповерхневному шарі ЛФП. Так досягнули максимальної модуляції інтерференційної картини між СЗ, сформованими ділянкою поверхні ЛФП у предметному плечі інтерферометра і пластиною 9 в його опорному плечі.

Для оцінювання нормальних переміщень досліджуваної ділянки поверхні під дією розчину NaCl та після, пластину з нанесеним ЛФП нагрівали приблизно до  $50^{\circ}\text{C}$  повітряним феном. Щоб проаналізувати зміну рельєфу поверхні і появу дефектів та відшарувань ЛФП від сталеві підкладки, реєстрували СІ до нагрівання поверхні ЛФП і після та вводили їх у комп'ютер у вигляді цифрових зображень. Попіксельно віднімаючи дві цифрові СІ, отримували РСІ. Спочатку реєстрували СІ ділянки поверхні ЛФП до початку дії розчину, далі заливали мензурку розчином і тримали його в мензурці 7; 14 і 21 days. Після кожного семидобового періоду розчин виливали і отримували РСІ таким же способом, як і до дії РАС, при цьому після першого і другого періодів розчин знову заливали в мензурку, контролюючи рівень заповнення мірними позначками. Час експозиції усіх СІ становив 1000  $\mu\text{s}$ .

Під час прикладання теплового навантаження переміщення кожної точки  $P$  на досліджуваній поверхні ЛФП призводить до різниці оптичного шляху  $\delta(P)$  від точкового джерела випромінювання хвильового фронту до точки спостереження в оптичному інтерферометрі. Різниця фаз визначається згідно з виразом:

$$\delta\varphi(P) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta(P).$$

В інтерферометрі Тваймана–Гріна за нормального переміщення поверхні на відстань  $d_z$  оптична довжина шляху вдвічі більша, тобто  $\delta(P) = 2d_z$ , звідки, згідно з поданим виразом  $\delta\varphi(P) = (4\pi/\lambda)d_z$ , а нормальне переміщення  $d_{z0}$  між сусідніми максимумами кореляційних смуг становить  $\lambda/2$ .

**Результати та їх обговорення.** Розвиток деформування поверхні ЛФП та корозійних дефектів і відшарувань на РСІ оцінювали, обчислюючи віддалі між кореляційними смугами вздовж двох паралельних ліній, розташування яких незмінне для усіх РСІ, отриманих до та після 7; 14 і 21 days дії розчину РАС на поверхню ЛФП.

Взаємним попіксельним відніманням двох цифрових СІ (рис. 3) одержали дві вертикальні паралельні лінії, вздовж яких будували профілі розподілу інтенсивності у кореляційних смугах. На поверхні ЛФП утворились майже прямі рівновіддалені кореляційні смуги, що свідчить про відсутність поверхневих деформацій. Спостерігали незначний рівномірний нахил поверхні ЛФП під кутом  $1,7 \cdot 10^{-4}$  rad в одному напрямку внаслідок нагрівання. Через додаткове розсіяння та перевідбивання світла у приповерхневих шарах ЛФП РСІ має розмиті краї та зашумлені смуги. Тому для аналізу переміщень поверхні використовували низькочастотну фільтрацію усіх РСІ.

Наведено (рис. 4) згладжені низькочастотним гауссівським фільтром профілі розподілу інтенсивності смуг уздовж двох вертикальних ліній (зверху вниз) на РСІ. Піки вздовж профілю – світлі смуги, а долини – темні. За профілями визначали переміщення поверхні вздовж них та зміщення  $\Delta l$  кожної кореляційної смуги на одному з профілів відносно іншого.

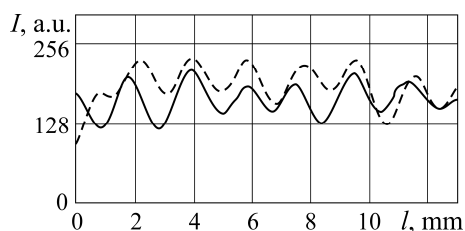


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Два згладжені профілі РСІ круглої ділянки поверхні ЛФП до дії РАС: лівий – штрихова крива; правий – суцільна.

Fig. 4. Two smoothed difference speckle interferogram profiles of a round area of the paint coating surface before the action of 3% NaCl solution: left – dashed curve; right – solid.

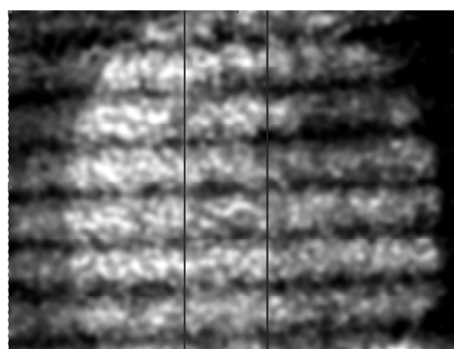


Рис. 3. РСІ до дії РАС на поверхню ЛФП. Вертикальні паралельні лінії – профілі розподілу інтенсивності у кореляційних смугах.

Fig. 3. Difference speckle pattern before the action of LCS on the PCS. Intensity distribution profiles in correlation bands were constructed along two vertical parallel lines.

Рис. 5. Нормальні переміщення поверхні ЛФП уздовж вертикальної лінії зверху вниз, розташованої справа від центра РСЗ на рис. 4.

Рис. 5. Normal movements of the PCS along the vertical line from top to bottom. The line is located to the right of the difference speckle pattern center in Fig. 4.

Подано (рис. 5) розподіл нормального переміщення  $d_z$  поверхні вздовж розташованої справа від центра РСІ на рис. 3 вертикальної лінії зверху вниз. Оскільки напрям переміщення у кореляційній ЦСІ знайти неможливо, то не важливо, на якому із двох профілів відбувається переміщення  $d_z$ . Поверхня рухається у нормальному напрямі (від площини), нахилиючись від нагрівання, при цьому жодних спотворень вздовж лінії переміщень нема. Переміщення верхнього краю поліуретанового ЛФП проти нижнього, тобто максимальне переміщення поверхні  $d_{\max} = 2,215 \mu\text{m}$ . Залежність зміщення  $\Delta l$  кожної кореляційної смуги від нормаль-

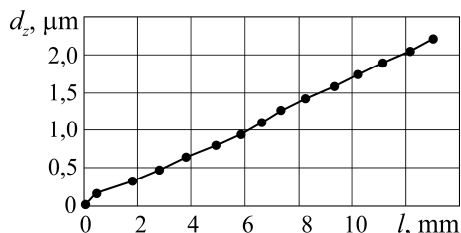


Рис. 5. Fig. 5.

ного переміщення поверхні  $d_z$  вздовж вертикального профілю, розташованого лі-  
віше від центра РСІ на рис. 3, наведена на рис. 6а. Малі  $\Delta l$  свідчать про збіжність  
двох профілів на рис. 4.

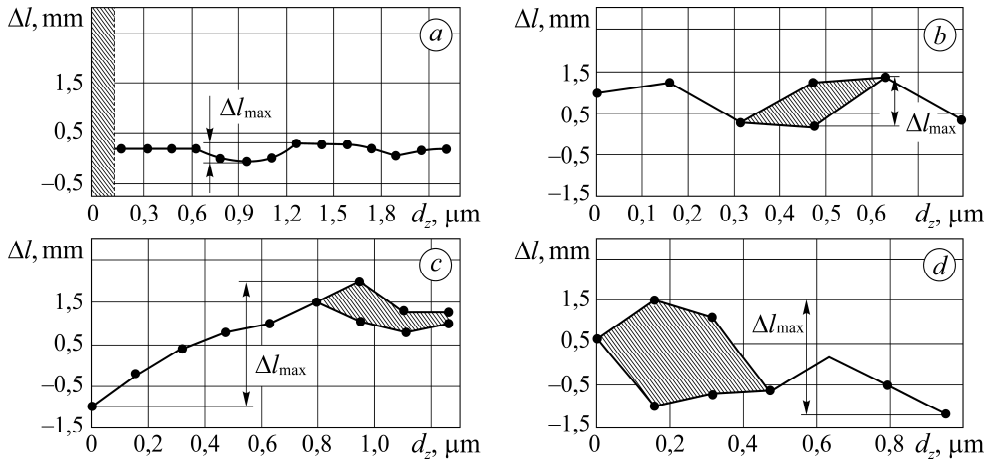


Рис. 6. Залежності зміщення кожної кореляційної смуги  $\Delta l$  від нормального переміщення  
поверхні  $d_z$  уздовж вертикального профілю до (а) і після 7 (b); 14 (c) і 21 (d) days дії  
на поверхню ЛФП 3%-го розчину NaCl: заштриховані зони – ділянки,  
де неможливо визначити зміщення  $\Delta l$  через дефекти та відшарування.

Fig. 6. Dependences of displacement of each correlation band  $\Delta l$  on normal displacement  $d_z$   
along the vertical profile before action (a) and after 7 (b); 14 (c) and 21 (d) days of action  
on the PCS of 3% NaCl solution: dashed zones – areas, where it is impossible  
to determine the value of  $\Delta l$  in terms of defects and delamination.

РСІ поверхні поліуретанового ЛФП також отримали після 7; 14 і 21 days дії  
РАС. Після кожного із цих періодів розчин виливали із мензурки, залишаючи її  
разом із ЛФП і сталеву підкладкою закріпленими у схемі експериментальної  
установки, і реєстрували СІ поверхні ЛФП до і після нагрівання (рис. 6).

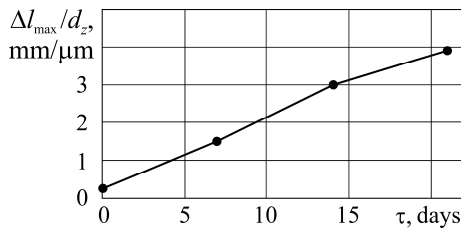


Рис. 7. Fig. 7.

Рис. 7. Часова залежність відносного максимального зміщення  
між кореляційними смугами.

Fig. 7. Time dependence of the relative maximum shift between correlation bands.

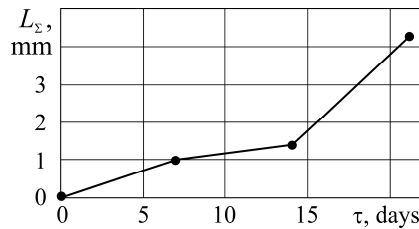


Рис. 8. Fig. 8.

Рис. 8. Залежність сумарних розмірів корозійних дефектів і відшарувань  $L_{\Sigma}$   
уздовж двох профілів на різницеєвих картинах СІ.

Fig. 8. Dependence of total sizes of corrosion defects and delaminations  $L_{\Sigma}$   
along two profiles on difference patterns of speckle interferograms.

Отримані залежності свідчать про постійне зростання параметра  $\Delta l$  з тривалістю дії РАС. Це викликано, насамперед, збільшенням локальних деформацій та кількості і розмірів корозійних дефектів і розшарувань. На досліджуваній ділянці поверхні за залежністю  $\Delta l_{\max}/d_{\max}$  (рис. 7) оцінювали деформування поверхні ЛФП та розвиток корозійних дефектів і відшарувань. Вона прямолінійна, що свідчить про рівномірне зростання деформацій. Розвиток дефектів та відшарувань оцінювали, обчислюючи заштриховані площі на рис. 6, прив'язуючи їх до сумарних розмірів дефектів і відшарувань  $L_{\Sigma}$  уздовж двох вертикальних профілів на РСІ. Залежність  $L_{\Sigma}$  від часу дії РАС (рис. 8) вказує на пришвидшений розвиток дефектів і відшарувань на кінцевій стадії.

Таким чином, за часовими залежностями  $\Delta l_{\max}/d_{\max}$  можна оцінювати кінетику деформування поверхні, а також швидкість росту корозійних дефектів і відшарувань за їх сумарними розмірами  $L_{\Sigma}$  вздовж паралельних профілів на РСІ.

### ВИСНОВКИ

Встановлено ефективність методу кореляційної ЦСІ для моніторингу зміни деформованого стану поверхні ЛФП, а також оцінювання швидкості росту корозійних дефектів і відшарувань за тривалості дії РАС. Одержані результати свідчать про можливість розроблення нових методик неруйнівного контролю поліуретанових ЛФП на основі оптико-цифрових методів та засобів ЦСІ.

1. *Application of dynamic speckle interferometry to the drying of coatings* / J. I. Amalvy, C. A. Lasquibar, R. Arizaga, H. Rabal, and M. Trivi // *Progress in Organic Coat.* – 2001. – **42**. – P. 89–99.
2. *Following the drying of spray paints using space and time contrast of dynamic speckle* / R. Arizaga, E. E. Grumel, N. Cap, M. Trivi, J. I. Amalvy, B. Yepes, and G. Ricaurte // *JCT Res.* – 2006. – **3**, № 4. – P. 295–299.
3. *Brun A., Brunel L., and Snabre P. Adaptive speckle imaging interferometry (ASII): New technology for advanced drying analysis of coatings* // *Surf. Coat. Int. Pt. B–C.* – 2006. – **89**, B3. – P. 251–254.
4. *Adaptive Speckle imaging interferometry: a new technique for the analysis of microstructure dynamics, drying processes and coating formation* / L. Brunel, A. Brun, P. Snabre, and L. Ciperetti // *Opt. Express.* – 2007. – **15**, № 23. – P. 15250–15259.
5. *The measurement of the diffusion coefficient of water in paints and polymers from their swelling by using an interferometric technique* / E. L. J. Goossens, A. J. J. van der Zanden, H. L. M. Wijen, and W. H. van der Spoel // *Progress in Organic Coat.* – 2003. – **48**. – P. 112–117.
6. *Singh Raman R. K. and Bayles R. Detection of decohesion/failure of paint/coating using electronic speckle pattern interferometry* // *Eng. Failure Analysis.* – 2006. – **13**. – P. 1051–1056.
7. *In situ and dynamic observation of coating failure behavior* / J. Gao, C. Li, H.-X. Feng, and X.-G. Li // *Progress in Organic Coat.* – 2020. – **138**. – P. 105387.
8. *Вороняк Т. І., Муравський Л. І., Гаськевич Г. І. Використання різницевої електронної спекл-інтерферометрії для неруйнівного контролю захисних і відновлювальних покриттів* // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів.* – 2005. – Вип. 10. – С. 203–208.
9. *Вороняк Т. І., Муравський Л. І. Контроль поверхневих переміщень та дефектів зразків конструкційних матеріалів методами електронної спекл-інтерферометрії* // *Методи та прилади контролю якості.* – 2006. – Вип. 16. – С. 41–47.

Одержано 14.03.2022