МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 681.5.08

ВИКОРИСТАННЯ ПРОФІЛОМЕТРІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНІ СТАЛІ З ПІТІНГАМИ І ПІТІНГОПОДІБНИМИ ДЕФЕКТАМИ

Б.П. Русин, А.Ю. Похмурський

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, м. Львів, МПС, 79601, тел. (8-322) 63-70-38, e-mail: andriy.pokhmurskyy@ipm.lviv.ua

Досліджені можливості застосування двох різних профілометричних методів для вивчення пітінгових корозійних пошкоджень на поверхні нержавіючої сталі. У безконтактному методі для отримання тривимірної цифрової моделі поверхні використовували оптичний 3D профілометр MikroCAD compact з програмним забезпеченням OdsCAD 4.0. Контактна профілометрія проводилась із застосуванням голкового 3D профілометра LV-50E фірми HOMMELWERKE.

Исследованы возможности применения двух разных профилографических методов для изучения питтинговых повреждений на поверхности нержавеющей стали. В бесконтактном методе для получения трехразмерной цифровой модели поверхности использовали оптический 3D профилометр MikroCAD compact с программным обеспечением OdsCAD 4.0. Контактная профилометрия проводилась с применением иглового профилометра LV-50E фирмы HOMMELWERKE.

There are investigational applicability of two different profilometrical methods for the investigation of the pitting damages on the surface of stainless steel. In the non-contact profilometrical method for 3D-modelling an optical profilometer MikroCAD compact with OdsCAD 4.0 software was used. Contact profilometry was carried out with a needle profilometer LV-50E from HOMMELWERKE Company.

Одним із розповсюджених видів руйнування поверхні деталей машин і апаратів є утворення пітінгів і подібних їм дефектів, які, за наявності впливу механічних навантажень, можуть переростати у тріщини і спричиняти руйнування конструкції. Тому отримання достовірної інформації про розміри та геометрію таких дефектів є важливою науково-технічною задачею. У більшості літературних джерел [1-2] передбачається аналіз розмірів дефектів і їх розподіл по поверхні у двовимірному зображенні на основі металографічних досліджень. Такий підхід не дає інформації про третю координату дефектів, зокрема глибину і форму, які власне визначають концентрацію напружень біля їх вершини.

За останні роки розвинуто нові методи, які на основі застосування контактної та безконтактної профілометрії, дефокусування поверхні пітінга та інших методів 3D реконструкції дають змогу отримати інформацію про глибину окремих дефектів [3-5]. Такі методи дослідження поверхонь набувають все більшого застосування у вимірювальних технологіях. Наприклад, для вимірювання, оцифровування та швидкого відтворення форми поверхні великих об'єктів досить успішно застосовують фотограметричний метод, суть якого полягає у 3D реконструкції поверхні шляхом аналізу серії зображень, що отримані при освітленні під різними кутами. Застосування цих методів для дослідження малих об'єктів або поверхневих дефектів малих розмірів у більшості випадків дуже складне, дає неточний результат або взагалі неможливе [6]. Існують деякі інші методи вивчення топографії поверхні за допомогою контактної або безконтактної профілометрії [7].

У даній роботі проведена порівняльна оцінка застосування оптичного та голкового профілометричних методів дослідження параметрів різної форми пітінгових корозійних пошкоджень на поверхні нержавіючої сталі.

Для дослідження використовували зразки із нержавіючої сталі 08Х18Н10Т діаметром 20

мм і товщиною 3 мм. Для отримання на поверхні пітінгів застосовували електрохімічне травлення у 3,5 %-му розчині NaCl при постійному струмі густиною 20 мА/см^2, час витримки 15...30 хв. Перед електрохімічною обробкою робочу поверхню шліфували, а частину зразків додатково полірували алмазною пастою із діаметром зерна 6 мкм.

Для оптичної 3D профілометрії використовували мікрооптичний вимірювальний пристрій MikroCAD compact, призначений для тридименсійного вивчення профілів поверхні та визначення її шорсткості. Основою цієї системи є цифровий світлопроектор, у середині якого знаходиться система мікродзеркал. Тривимірний профіль досліджуваного зразка отримується за лічені секунди і завдяки спеціальному програмному забезпеченню передається для подальшого аналізу. Цей метод використовує принцип накладання на досліджувану поверхню різних світлових граток з однаковими регулярними відрізками [6]. Отримані двовимірні зображення дозволяють провести тривимірну реконструкцію поверхні.

У випадку наявності малих спотворень, що виникають під час зйомки, наприклад, забруднення поверхні або об'єктива, відсутність чітких ліній або несприятливий контраст, система дозволяє їх автоматично усунути. Встановлення геометричної залежності між координатами ґраток та координатами поверхні відіграє основну роль в процесі калібрування камер та й реконструкції загалом і визначається через функцію ремісії [6].

Принцип контактної профілометрії полягає у тому, що по поверхні досліджуваного зразка протягується перо профілометра, яке завжди знаходиться в контакті з нею. Голка пера переважно виготовлена у формі конуса з кутом 60° або 90°, на кінці якого розміщено алмазну кульку з радіусом від 2 до 10 мкм. Перо протягується по поверхні з постійною швидкістю або воно є зафіксоване, а поверхня переміщується під ним. Зміни вертикального положення пера трансформуються в аналогові або цифрові сигнали, в результаті чого отримується профіль поверхні [8].

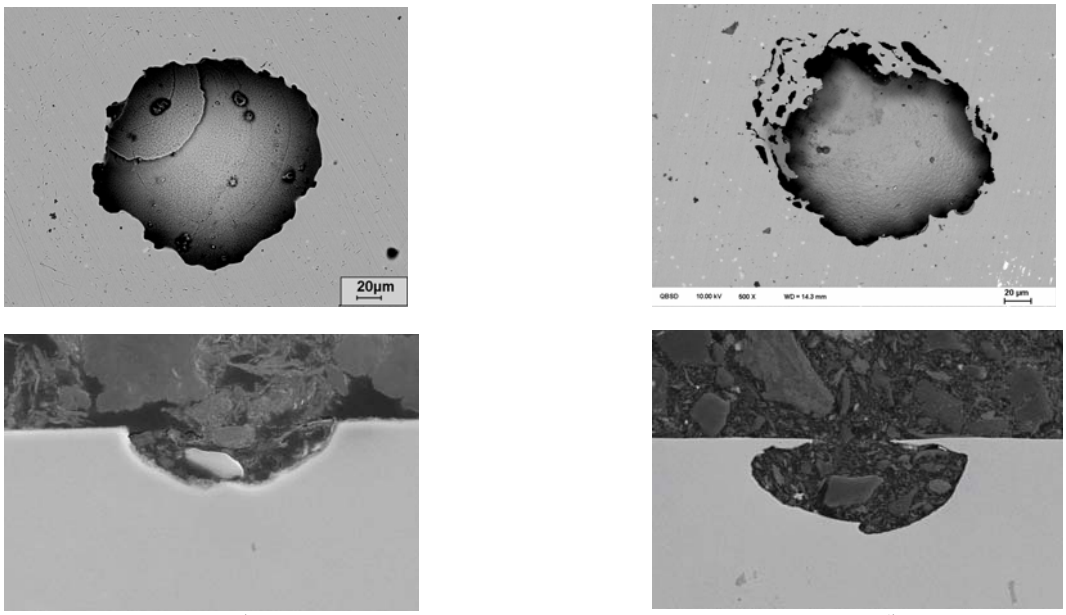
У нашій роботі використовували профілометр фірми HOMMELWERKE марки LV-50E, рухомий стіл марки MSC-2, персональний комп'ютер TURBOWAVE 8000 та спеціальне програмне забезпечення TURBOWAVE v.7.20. Ця система дозволяє виміряти як профіль зразка, так і відтворити топографію цілої області на зразку розміром не більше 4х4 мм, що є суттєвим обмеженням цього методу. Для отримання топографії цієї області пристрій робить 1600 одиночних профілів зі швидкістю V_t=0,15мм/с. Час проведення цих вимірювань складає більше 10-ти годин. В результаті отримують скомпоновану цифрову модель поверхні, на якій проводять подальший аналіз.

Проведений аналіз більше сотні пітінгів, одержаних на нержавіючій сталі під час її травлення, показав, що ці корозійні пошкодження відрізняються між собою за розміром, формою та яскравістю (рис.1). За формою їх умовно можна поділити на дві групи: відкриті (рис. 1, *а*) і частково закриті (рис. 1, *б*) дефекти, що відповідають стабільним і метастабільним пітінгам. Природа їх утворення пояснюється різною товщиною і стійкістю оксидної плівки на полірованій та шліфованій поверхнях.

Оскільки методики як контактної, так і безконтактної профілометрії мають певні геометричні обмеження до форми досліджуваних об'єктів, вивчення розмірів і форми частково закритих пітінгів є проблематичним і в даній роботі не розглядається.

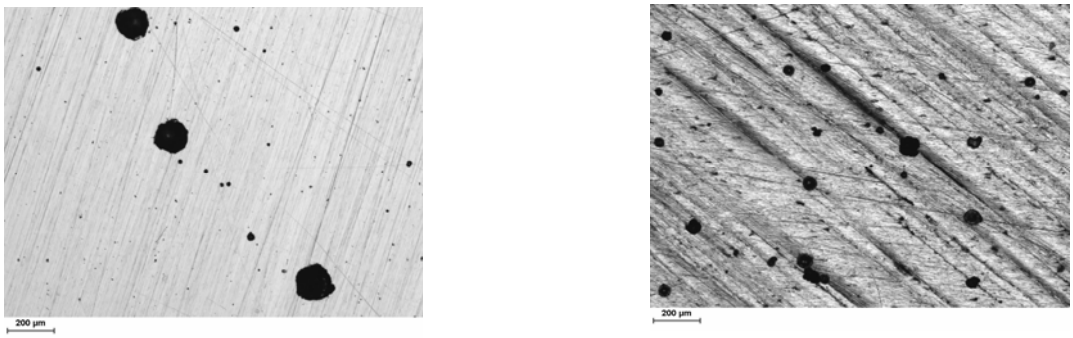
Слід зазначити, що частота появи частково закритих пітінгів на полірованій поверхні є вищою порівняно з шліфованою (рис.2). Якщо для шліфованої поверхні є характерними малі пітінги неправильної форми, що переважно утворюються в канавках, які залишились від механічного шліфування, то полірована поверхня має набагато меншу кількість дефектів малих розмірів. У той же час пітінги на полірованих поверхнях є переважно правильної сферичної форми і досить великих розмірів, видимий отвір яких становив від 50 до 300 мкм (рис. 2). При застосуванні методу оптичної безконтактної профілометрії вихідне зображення поверхні отримували шляхом сканування поверхні цілого зразка.

У результаті такого сканування отримується цифрова модель, яка містить вихідні дані для подальшого аналізу. Наступні операції та виміри виконували за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке прораховує потрібні величини з отриманої цифрової моделі досліджуваної поверхні. За допомогою 3D оптичної профілометрії можливе вивчення тільки відкритих пітінгів, які не мають напливів над видимим отвором, що є перешкодою для проходження світлового променя і отримання відповідного зображення. У порівнянні корозійних дефектів, сформованих на шліфованій поверхні, окремі пітінги на полірованій поверхні були значно більших розмірів (рис. 2, *а*).



а) *б)*

Рисунок 1 – Вигляд відкритого (*а*) і частково закритого пітінгів (*б*)



а) *б)*

Рисунок 2 – Вигляд полірованої (*а*) і шліфованої (*б*) поверхні нержавіючої сталі, протравленої за однакових режимів

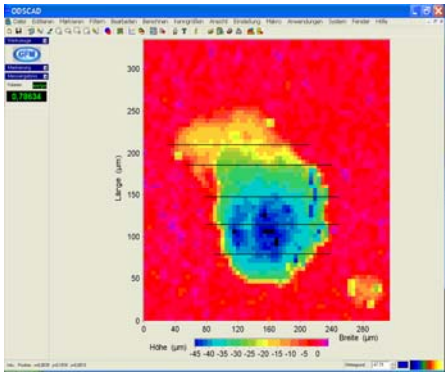
Крім того, менша шорсткість полірованої поверхні дозволяє більш точно проводити ідентифікування окремих пітінгових дефектів.

Використовуючи цей метод, досліджено приблизно по десять найбільших одиночних пітінгів на різних поверхнях. До основних геометричних характеристик пітінгів, які отримані цим методом, слід віднести наступні величини: умовний діаметр, об'єм (рис. 3, *а*), профіль одиночного дефекту (рис. 3, *б*), з якого більш точно можна визначити деякі геометричні параметри, наприклад, співвідношення між глибиною та шириною дефекту.

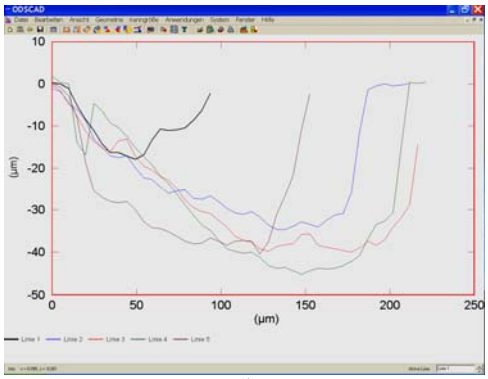
Побудова окремого профілю (перерізу) дефекту з отриманого зображення поверхні здійснюється за допомогою вбудованої функції програмного забезпечення, яка дозволяє провести уявну лінію (серію ліній), профіль якої підлягає детальному аналізу (рис. 3).

Тривимірну модель поверхні з дефектом можна також представити у різних формах: з кольоровим розподілом висот (рис. 4, *а*) або у сірій шкалі (рис. 4, *б*). Також є можливість інвертування отриманої моделі (рис. 4, *в*), коли висоти представляються як впадини і навпаки. Це дозволяє спостерігати пітінг у вигляді випуклості на поверхні, що в свою чергу збільшує наглядність результатів.

Недоліком цього методу є досить високі вимоги до якості аналізованої поверхні, зокрема його обмеженість під час аналізу блискучих поверхонь. У такому випадку спостерігається наявність так званих «дзеркальних компонент».

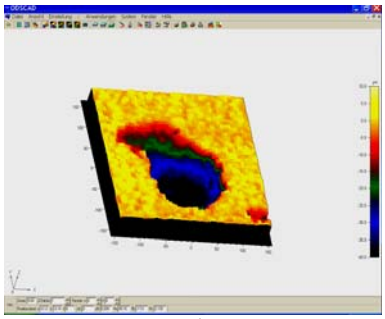


а)

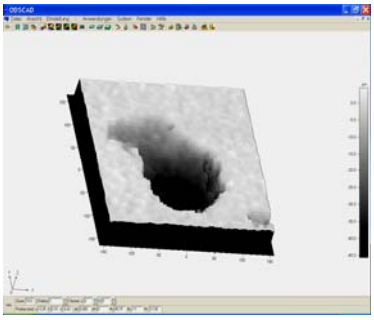


б)

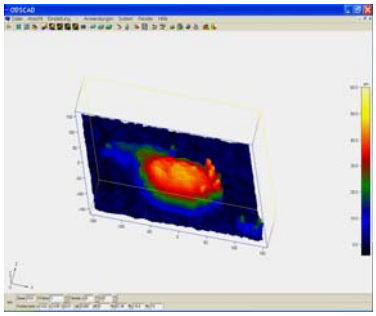
Рисунок 3 – Зображення одиночного дефекту з порахованим об'ємом(*а*) і різні профілі цього ж дефекту (*б*)



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Результат реконструкції одиночного пітінгу за допомогою оптичного профілометра

При цьому, промінь, який дзеркально відбивається від мікроділянки поверхні і не потрапляє в об'єктив, дає на зображенні характерні чорні точки, які підлягають мануальному усуненню. У той же час, дзеркальне відбиття близьких до нормалі променів може викликати часткове засвітлення зображення. Для прикладу, на рис. 5 показаний випадок, коли із-за дзеркального ефекту, що спостерігається при аналізі більшості полірованих металів, виникають яскраві засвітлені області з однієї із сторін пітінгів, які не відповідають реальній поверхні.

Для одержання більш достовірної інформації, дослідження геометричних характеристик та проведення 3D реконструкції у таких випадках доцільно використовувати метод реплік. Репліка – це відбиток поверхні, який отримують за допомогою епоксидних смол, каучуків, силіконових або інших полімерних матеріалів. Ці матеріали повинні мати високу текучість у рідкому стані та мінімальну зміну об'єму в процесі затвердівання.

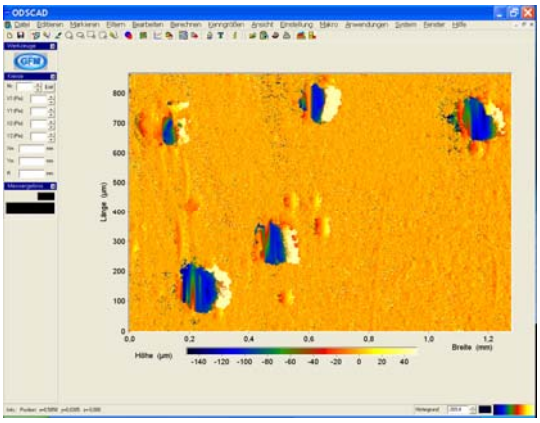


Рисунок 5 – Зображення засвітлених зон на поверхні металу

Метод реплік дозволяє отримати інверсне представлення вибраного об'єкту, а також має перевагу у випадку необхідності вивчення великогабаритних поверхонь та інших

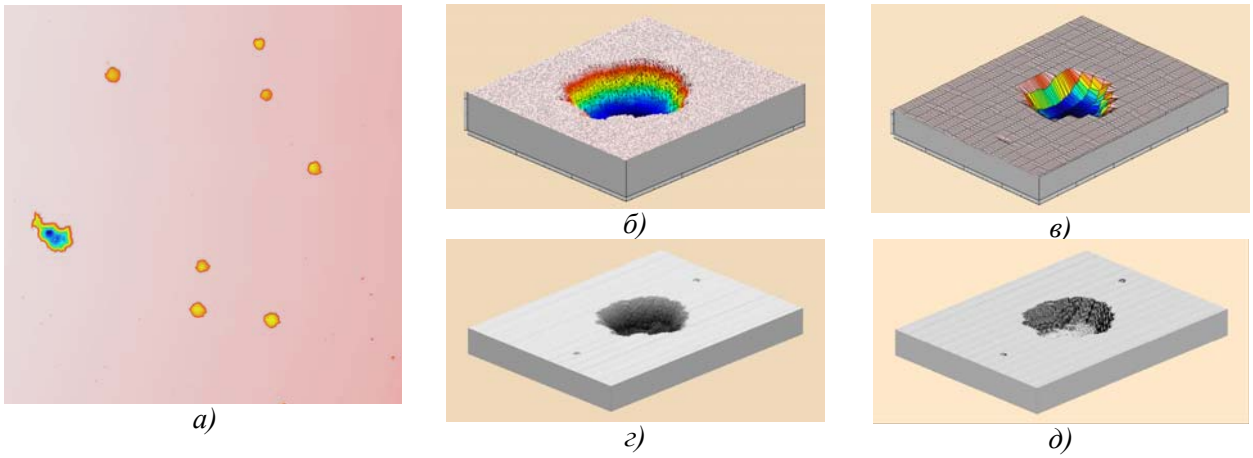
конструкцій в польових умовах, зокрема резервуарів, трубопроводів, будівельних конструкцій, що не можуть бути досліджені з застосуванням електронного чи оптичного мікроскопів. Переважно репліки вивчають за допомогою оптичної мікроскопії, бо в скануючому електронному мікроскопі виникає проблема підбору матеріалу репліки, який б не розпилювався у вакуумі. Також під час дослідження пітінгів складної форми та малих розмірів заповнення масою репліки простору дефектів може бути недостатнє для точного відтворення реальної поверхні [9]. Крім того, в процесі відділення застиглої репліки від поверхні зразка може відбуватися як руйнування тонких країв пітінгів, так і відрив малих фрагментів самої репліки. У випадку наявності мікропор повітря залишається всередині пори, що також спотворює відбитки корозійних пошкоджень.

Вигляд поверхні полірованого зразка, отриманий за допомогою механічного профілометра при контактній 3D профілометрії, представлено на рис. 6, *а*. Це результат співставлення всіх виміряних одиночних профілів, які автоматично об'єднані програмою у одну дводименсійну площину. Зображення відповідає ділянці поверхні розміром 4х4 мм і є результатом сумування 1600 одиночних профілів. З отриманої цифрової моделі можна проводити подальший більш детальний 3D аналіз окремо вибраних областей (рис. 6, *б*).

Основні функції та можливості даної системи дозволяють проводити обрахунок діаметру окремих об'єктів, різних розмірів та відстаней між об'єктами; отримати контурні діаграми (поверхневі діаграми у вигляді «зверху», де кольори відповідають певним діапазонам значень висот); використання фільтрів шорсткості та згладжування; фотосимуляцію; отримання поодиночних профілів та отримувати різні представлення 3D моделей досліджуваного об'єкта.

Використання оптичного профілометра має свої вимоги до досліджуваного об'єкту. Поверхня не повинна бути занадто блискучою, але й не дуже затемненою, бо тоді важко розпізнаються об'єкти, що знаходяться на поверхні. Під час дослідження блискучих (полірованих) поверхонь з ефектом дзеркального відбиття виникає велика кількість пікселів, які не несуть інформації. Такі пікселі називаються «інвалідними» і автоматично замальовуються програмою чорним кольором. При побудові 3D моделі всі чорні пікселі зображаються у вигляді надвисоких піків. Для точного аналізу необхідно, щоб кількість таких пікселів була мінімальна. Програма має можливість як ручного, так і автоматичного усунення цих пікселів, що в свою чергу впливає на точність побудови апроксимованої поверхні. До основних переваг безконтактної профілометрії над контактною є те, що досліджувана поверхня не пошкоджується пером профілометра, а також часова перевага при побудові 3D моделей.

Метод контактної профілометрії має також свої обмеження щодо використання його при вивченні мікрооб'єктів.



а) – результат співставлення всіх отриманих профілів; б)-д) – порахована 3D модель окремого пітінгу в різних формах представлення: б) - точковому, в) - сітковому, г) – в градації сірого, д) – фотосимуляція

Рисунок 6 – Результат вимірів 3D профілометра

Проблема полягає у тому, що розміри досліджуваних дефектів обмежені геометричними розмірами голки пера (радіус 5 мкм, кут 60°), яка не проходить по дну мікродефектів з малими отворами, а також не відтворює рел'єфу стінок пітінга у випадку їх значної кривизни. Ці обмеження можуть призвести до значних похибок у обрахунках, особливо при статистичній обробці даних вимірювання. До недоліків цього методу можна також віднести невелику область дослідження (4х4 мм) та великі часові затрати (більше 10 год. на отримання однієї тривимірної моделі). До переваг цього методу слід відести високу точність контурів пітінгового отвору та можливість використання його як на полірованих так і на шліфованих поверхнях. Використання реплік у цьому методі є більш проблематичним, бо голка пера може зруйнувати поверхню самої репліки.

У перспективі варто було б зосередити більше уваги на створенні цифрових моделей поверхні зразків чи об'єктів методом аналізу серії дводименсійних металографічних зображень.

ВИСНОВКИ

Метод безконтактної профілометрії придатний для точного аналізу поверхні сталі з пітінговими утвореннями тільки за умови, що дефект є відкритим, без скритих зон, в які не потрапляє світло. Наявність на поверхні частково закритих дефектів, а також ділянок, для яких характерне дзеркальне відбиття світла, призводить до виникнення похибок у побудові моделі.

Стан поверхні досліджуваних зразків має значний вплив на отримання достовірних зображень. У випадку полірованих поверхонь та для проведення детальнішого аналізу внутрішньої морфології мікродефектів складної форми доцільно використовувати репліки.

Застосування методу контактної профілометрії дозволяє отримати більш точні результати геометричних параметрів дефектів, у той же час є набагато менш продуктивним у порівнянні з безконтактним методом.

Метод контактної профілометрії, застосований для вивчення пітінгоподібних дефектів малих розмірів, що мають більшу глибину ніж видимий отвір, не дає точного представлення про третю координату через зависання голки профілометра на краях дефектів.

Література

1. Металлография железа. Т.1. Основы металлографии / Пер. с англ. под ред. Ф.Н. Тавадзе. – М.: Металлургия, 1972. – 248с.

2. Тищенко О.Ф., ВалединскийА.С. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М.: Машиностроение, 1977. – 352 с.

3. Morphological analysis of pits formed on Al 2024-T3 in chloride aqueous solution / J.W.J. Silva, A.G. Bustamante, E.N. Codaro, R.Z. Nakazato, L.R.O. Hein. – Applied Surface Science, 236(2004). – P. 356–365.

4. Multiscale characterization of pitting corrosion and application to an aluminum alloy /George N. Frantziskonis, Laura B. Simon, Jung Woo, Theodore E. Matikas. – Eur. J. Mech. A/Solids, 19 (2000). – P. 309–318.

5. Whitehouse D.,Handbook of Surface Metrology. – Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1994. – 988 p.

6. Chen M., Frankowski G. Kalibrierstrategie für optische 3D-Koordinatenmessgeräte, basierend auf streifenprojektionstechnischen und fotogrammetrischen Algorithmen. – Technisches Messen, 69 (2002). – P. 240-250.

7. Robinson G. M., Perry D. M. and Peterson R. W. Optical interferometry of surfaces. – Sci. Am., 265, July 1991. – P.67–71.

8. Rometsch R. and Letzner R.-D, Rauheitsmessung: Theorie und Praxis. – Hommelwerke GmbH, Schwenningen. – 1993.

9. Forlerer E., Castillo Guerra R., Ermini E. Use of topographic polymeric replica to characterize electric corrosion failure. – Wear, 263 (2007). – P. 1508–1512.

Поступила в редакцію 18.11.2008р.