



АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ТОПОЛОГІЇ ПОВЕРХОНЬ МАТЕРІАЛІВ

О. Ю. ПОВСТЯНОЙ, В. Д. РУДЬ, Ю. А. МЕЛЬНИК, Н. Ю. ІМБІРОВИЧ

Луцьк. нац. техн. ун-т. 43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56. E-mail: povstjanoj@mail.ru

Аналіз сучасних світових літературних джерел показав, що макроскопічна поведінка матеріалу безпосередньо залежить від особливостей його мікроструктури. Кількісний підхід при аналізі дозволяє виявити ту оптимальну структуру, яка в найбільшій мірі відповідає умовам служби матеріалу. Вивчення можливостей та оцінки сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень з метою визначення якісних та кількісних характеристик різноманітних матеріалів продиктовано науковими та виробничими задачами, які виникли в сучасному матеріалознавстві сьогодні. В даній статті наведено комплексний аналіз сучасних оптичних методів досліджень мікро- та макроповерхонь матеріалів. Показано можливості та оцінку сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження при обробці металографічних зображень. Висока роздільна здатність та особливо велика глибина фокуса, простота підготовки об'єктів досліджень, широкі можливості елементного аналізу при використанні різних систем реєстрації рентгенівського випромінювання дозволяють успішно використовувати методи мікро- та макрофрактографічного аналізу у матеріалознавчих дослідженнях для вивчення структури та елементного складу поверхонь зношування, тертя, руйнування, корозії, хімічної взаємодії, включень. Цифрова обробка зображень дозволяє суттєво збільшити можливості проведення мікроскопічних досліджень. *Бібліогр.* 25, рис. 7.

Ключові слова: фрактографія, топологія поверхонь, електронна мікроскопія, металографічні зображення, мікроструктура

Стрімкий розвиток обчислювальної техніки і методів цифрової обробки зображень останнім часом дав можливість значно розширити автоматизацію науково-дослідних робіт в багатьох областях науки і техніки. Макроскопічна поведінка матеріалу безпосередньо залежить від особливостей його мікроструктури. Кількісний підхід при аналізі дозволяє виявити ту оптимальну структуру, яка в найбільшій мірі відповідає умовам служби матеріалу.

Вивчення структурних характеристик металів і сплавів – одна з ключових задач сучасного матеріалознавства, на основі якої базується процес створення нових та покращення властивостей вже існуючих матеріалів. Вивчення можливостей та оцінки сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень з метою визначення якісних та кількісних характеристик різноманітних матеріалів продиктовано науковими та виробничими задачами, які виникли в сучасному матеріалознавстві сьогодні.

В XXI ст. впровадження сучасних інформаційних технологій вимагає вдосконалення багатьох традиційних систем обробки та аналізу інформації. Для виробничого контролю вже недостатньо двовимірних характеристик на основі параметрів шорсткості, необхідним є комплексний тривимірний опис. Одним із ключових моментів сучасного матеріалознавства є мікротопографія, яка включає врахування статистичних характеристик матеріалів.

Для тривимірної інтерпретації мікрооб'єктів розроблена низка різноманітних методів [1–4].

Поряд з класичними контактними методами, які раніше були основними для визначення параметрів і тим самим якостей мікроповерхонь, сюди відносяться численні методи з області оптичної мікроскопії. Для значних збільшень використовуються методи растрово-електронної та скануючої зондової мікроскопії, які з високою роздільною здатністю дозволяють виконувати дослідження на атомарному рівні [5]. Фотограмметричні методи можна використовувати для просторового аналізу мікрофотографій і знімків електронно-світлових та електронних мікроскопів. Водночас для оптичних досліджень поверхонь вже давно є безліч різноманітних модифікованих методів [6–10].

Сучасні методи дослідження 3D-геометрії об'єктів (рис.1) можна розділити на два великих класи – контактні (координатно-вимірвальні машини, щупові прилади, контактні профілометри) і безконтактні, серед яких найбільш поширеними є методи світлового перерізу, стереоскопічні, інтерференційні і растрові методи. До безконтактних методів належать також і фотограмметричні методи.

Контактні методи вимірювання. Прилади, які базуються на контактних методах вимірювання (профілометр, профілографи) використовуються порівняно тривалий час. Класичною технікою для тривимірного вимірювання мікроповерхонь є контактний (профільний) метод [11]. При цьому поверхня зразка сканується за окремими профілями алмазною голкою, після чого окремі профілі в своїй сукупності відображають модель поверхні, з

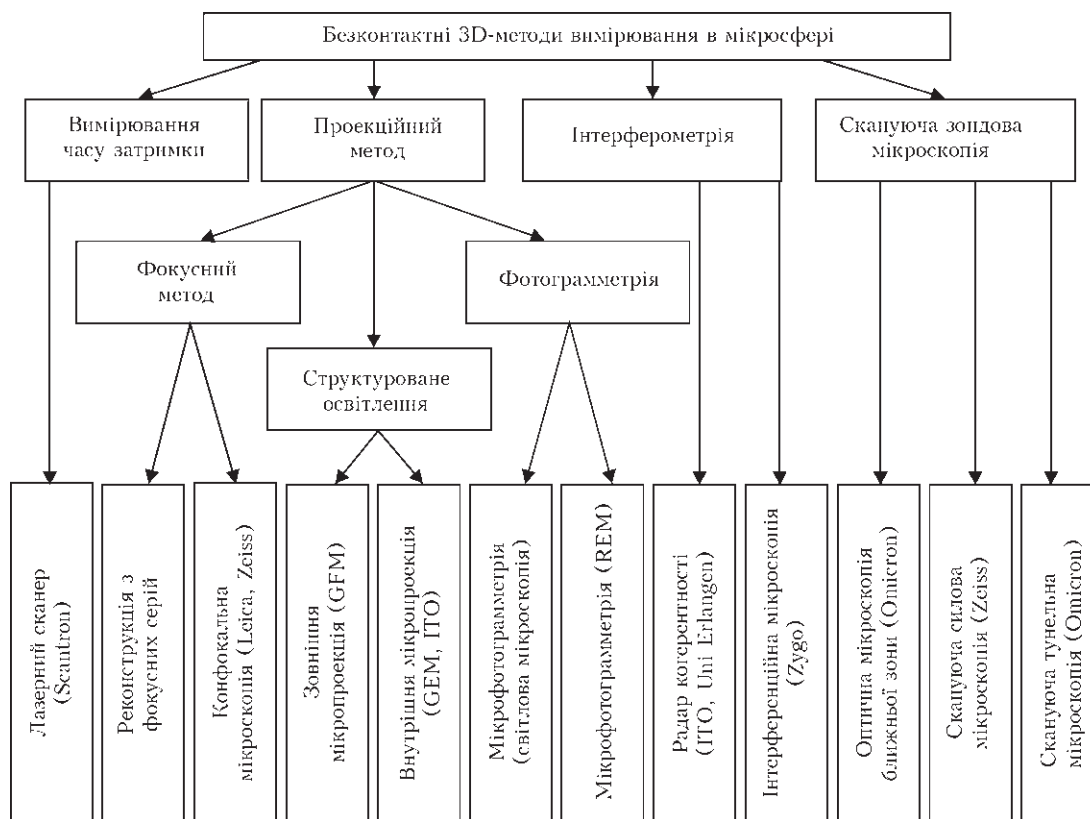


Рис. 1. Сучасні методи дослідження 3D-геометрії об'єктів якої можна визначити, наприклад, 3D-шорсткість (рис. 2).

Точність методу залежить як від точності позиціонування об'єктного столика і вимірювальної системи, так і від радіуса вістря голки, який зазвичай становить від 5 до 0,1 мкм [1, 6]. Через закруглення вістря голки відбувається згладжування вимірювань, оскільки менші нерівності від діаметра вістря не можна охопити. Це метод, який переважно використовується для вимірювання шорсткості поверхні, і, попри високу надійність, має певні обмеження.

Безконтактні методи вимірювання. Багато задач промислового контролю та проектування вимагають отримання даних про геометричні форми об'єктів у тривимірному просторі. Для вирішення цих задач широко застосовуються безконтактні методи вимірювань, серед яких найбільш успішними є оптичні методи.

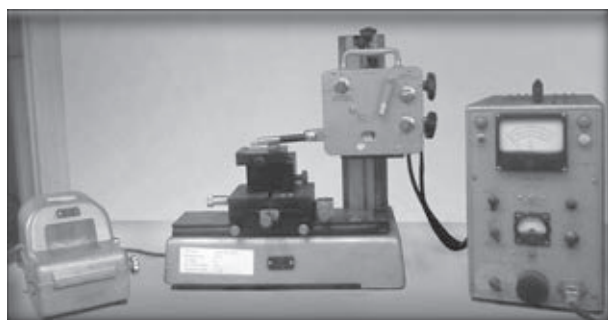


Рис. 2. Профілограф-профілометр для визначення шорсткості та хвилястості поверхонь

До методів вимірювання, що працюють у безконтактному режимі, відносять проекційні методи, інтерферометричні та методи скануючої електронної мікроскопії [12, 13]. Технології, які відносяться до цих методів, значною мірою залучаються також для визначення топографії поверхні в окремих мікрообластях (рис. 3).

Водночас деякі методи скануючої зондової мікроскопії дозволяють відтворювати мікротопографію в нанометровому діапазоні, методи електронної мікроскопії дають можливість отримувати просторову інформацію про мікроструктуру (рис. 4).

В останні роки набули значного поширення методи вимірювання форми поверхні, які базу-

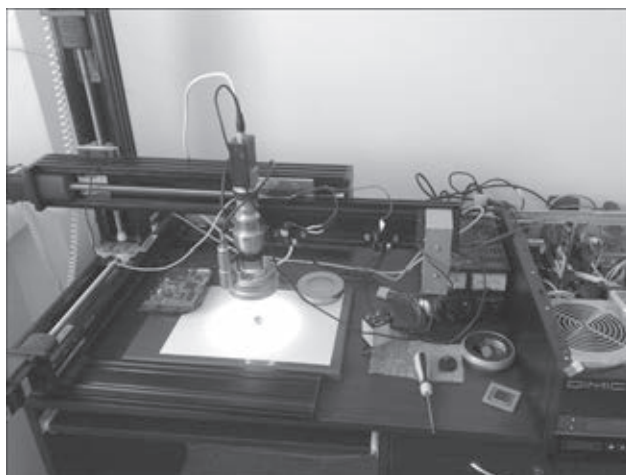


Рис. 3. Загальний вигляд модульного комплексу оптичного аналізу зображень Dimic 1000

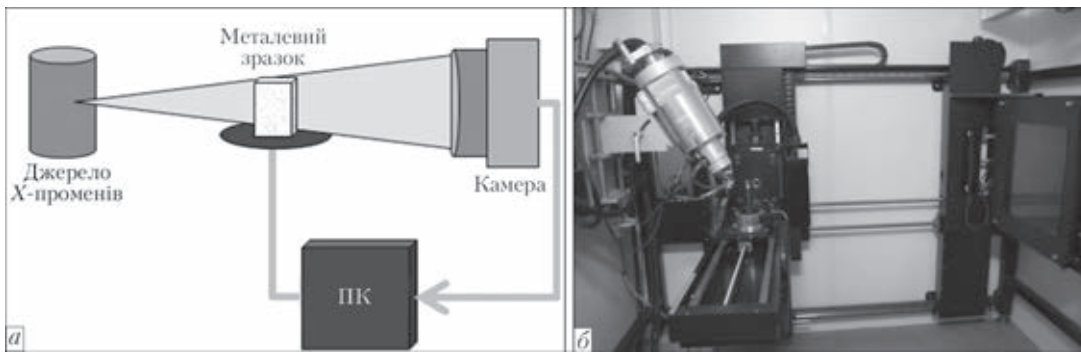


Рис. 4. Принципова схема (а) та томограф X-ТЕК 225/230 kV СТ (б)

ються на фазових вимірах. Серед них найбільш відомими є:

- профілометрія методом фазових кроків (Phase Shifting Profilometry);
- профілометрія методом Фур'є-перетворень (Fourier Transform Profilometry).

В цих методах використовується спеціальний вид освітлення об'єктів, так зване структуроване світло. На досліджувану дифузно-відображувальну поверхню проектується періодична структура, часто у вигляді системи паралельних чорно-білих напівтонових чи кольорових смуг. Відображене від об'єкта світло використовується для побудови зображення. Якщо напрямки проєкціонування смуг та реєстрації зображення об'єкта не співпадають, то через паралакси висхідна регулярна система смуг спотворюється і зображення об'єкта нагадує інтерферограму, отриману в полосах максимальної ширини, так званий муаровий ефект [14, 15].

Інтерферометричні методи. Вимірювання рельєфу поверхні оптичними безконтактними методами в автоматичному режимі з високою точністю є важливим завданням при контролі продукції промислового виробництва. Сучасна інтерференційна профілометрія широко застосовується в метрології, промисловості і наукових дослідженнях.

Інтерференційні методи дають можливість вимірювати рельєф «технічних» поверхонь з роздільною здатністю менше 0,2 мкм, похибкою менше 0,1 мкм і високою продуктивністю (більше 100 точок вимірювання в секунду).

Широке застосування нанотехнологій і наноматеріалів в світовому та вітчизняному промисловому виробництві, постійно зростаючі вимоги до контролю якості промислових виробів машинобудування, електроніки і точної механіки роблять оптичну низько когерентну інтерферометрію одним із найбільш перспективних напрямків сучасного приладобудування.

У зв'язку із розвитком оптико-електронної бази, комп'ютерів та програмного забезпечення апаратура і методи низько когерентної інтерферометрії постійно вдосконалюються. На даний час багато зарубіжних фірм (Zeiss, Zygo, Veeco) пропонують широкий спектр мікроскопів-профі-

лометрів на основі низько когерентної інтерферометрії. Але вони призначені, в більшості, для роботи в лабораторних умовах. Висока вартість інтерферометричних профілометрів обмежує їх доступність для наукових досліджень і практичного застосування (рис. 5).

Наступним інтерферометричним методом вимірювання поверхні, який також застосовується в мікрообластях, є інтерферометрія спеклів. Спекли виникають через явища інтерференції на оптично шорстких поверхнях, які рефлектують світло дифузно. При шорсткій поверхні, яка освітлюється лазерним променем, цей ефект виражається тим, що розподіл інтенсивності усередині відблиску є негомогенним [16–18].

Системи для визначення топографії поверхні за допомогою структурованого світла найчастіше використовуються для визначення відстаней безпосередньо до поверхні об'єкта зі складним профілем і відзначаються простотою реалізації, потенційно високою точністю (похибки порядку декількох мікрометрів) та швидкодією (до 1000 і більше вимірювань в секунду). Суть проєкційного методу полягає в освітленні поверхні досліджуваного зразка вузьким зондуючим пучком;

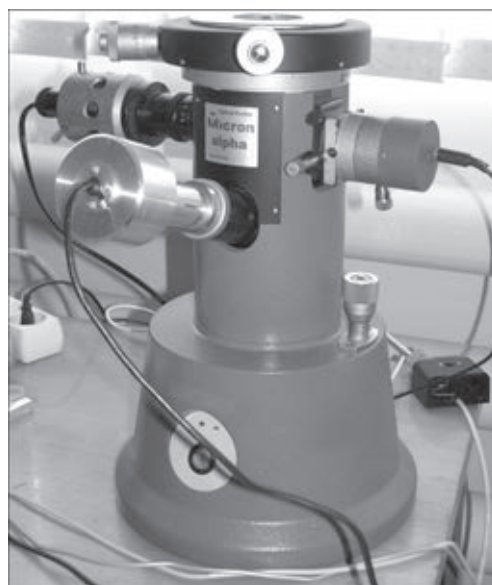


Рис. 5. Безконтактний інтерференційний тривимірний профілометр «Мікрон-альфа»



Рис 6. Сканирующий конфокальный микроскоп LSM 710

формуванні в розсіяному світлі зображення точки оптичною системою, розміщеною під кутом до пучка зондування, реєстрації цього зображення та розрахунку поверхні.

Конфокальна лазерна скануюча мікроскопія (CLSM або LSM) – це один із методів світлової мікроскопії, який забезпечує опис детермінованих і недетермінованих структур поверхні. Із врахуванням високої швидкодії і великих об'ємів даних найбільш життєздатне рішення забезпечують оптичні вимірювальні системи. Однак при їх використанні приходиться стикатись з такими явищами, як круті зкоси, перемінні відображення, які при обробці та вимірюванні поверхонь можуть створити хибні зображення (рис. 6).

Латеральна роздільна здатність LSM обмежується доступною роздільною здатністю світлової мікроскопії і роздільною здатністю скануючого лазера. На відміну від інтерферометричного зображення цей метод забезпечує надійні дані вимірювань технічних поверхонь, які можна співставити із результатами використання найбільш точних контактних приладів [19].

Основними перевагами конфокальної мікроскопії у порівнянні із звичайною світловою мікроскопією є: висока контрастність зображення; отримання «оптичних зрізів» та на їх основі 3D-реконструкція; мультиспектральні дослідження із високим ступенем розподілу сигналів; можливість застосовувати методи цифрової обробки зображень. Недоліками LSM-вимірювань слід вважати складність налаштування та високу вартість обладнання та його експлуатації.

Метод РЕМ. Растровий електронний мікроскоп застосовують для роботи зі збільшенням від 50 до 100 тис. крат, при цьому глибина різкості в 300–500 разів більша, ніж у світлових мікроскопів (рис. 7). Зразок може бути нахилений до 45° відносно горизонтальної площини із утриманням

фокуса по всій поверхні. Завдяки великій глибині фокуса РЕМ створює «об'ємність» зображення і суттєво полегшує кількісну 3D-інтерпретацію мікротопографії зламів. На таких мікроскопах проводиться пряме дослідження поверхні зламу без приготування спеціальних реплік чи тонких фольг, як це потрібно в просвічуючій електронній мікроскопії. За допомогою РЕМ можна отримати 3D-картину зламу, здійснювати сучасні фрактографічні дослідження не тільки для аналізу причин руйнування матеріалів, але і для контролю якості виробів, а також як засіб для вивчення експлуатаційних властивостей металів та управління ними [20, 21].

Метод растрової електронної мікроскопії дає можливість вивчати мікротопографію (фрактографію) поверхонь зразків руйнування (зламів) після випробувань і здійснивши класифікацію ви-



Рис. 7. Растровий електронний мікроскоп JSM-7401



дів руйнування по типу зламу можна стверджувати про енергоємності процесів руйнування.

РЕМ дає можливість вивчати поверхню металоконструкцій з метою виявлення мікротріщин, здійснювати кількісну оцінку шорсткості металу; вивчати кінетику росту тріщини в зразку та встановлювати місця зародження магістральних тріщин, напрям та швидкість їх поширення; вивчати вплив фазових включень на механізми руйнування; досліджувати зв'язок мікротопографії зламів з вихідною структурою, вивчати морфологію фазових складових та їх об'ємну конфігурацію на поверхні протравлених мікрошліфів та зламів.

Перспективи розвитку фрактографії, топології та аналізу зображень. Висока роздільна здатність та особливо велика глибина фокуса, простота підготовки об'єктів досліджень, широкі можливості елементного аналізу при використанні різних систем реєстрації рентгенівського випромінювання дозволяють успішно використовувати метод мікро- та макрофрактографічного аналізу у матеріалознавчих дослідженнях для вивчення структури та елементного складу поверхонь зношування, тертя, руйнування, корозії, хімічної взаємодії, включень і т. д.

Оптичні методи аналізу зображень дозволяють одержувати тривимірну оцінку довільних поверхонь і, отже, значно розширює можливості фрактографічних досліджень.

Проте для комплексного вивчення поверхні матеріалів за електронним зображенням необхідно розробляти різноманітні методики розрахунку комплексних характеристик, які б визначали найбільш загальні властивості поверхні, що характеризують її стан, і величину мікропараметрів, що можливо при наявності відповідних алгоритмів і програмного забезпечення, а також при проведенні сертифікації поверхонь у мікро- та нанометровому діапазоні відповідно до норм і вимог міжнародних стандартів.

Висновки

Методами оптичної електронної мікроскопії успішно вирішуються задачі фізичного матеріалознавства, для яких кількісний аналіз зображень тонкої структури чи рельєфу поверхні із застосуванням вимірів є найбільш доцільним, а в ряді випадків і є домінуючим. Електронно-мікроскопічні дослідження уможливають аналіз об'ємної картини рельєфу поверхні матеріалів різноманітного призначення.

Сучасні методи фрактографії, топології та аналізу зображень характеризуються високою точністю, достовірністю та доступністю для широкого кола спеціалістів в одержанні кількісної інформації при металографічному досліджуванні [22–25].

Цифрова обробка зображень дозволяє суттєво збільшити можливості проведення мікроскопічних досліджень. Поєднання методів фотограмметрії та топології є перспективним у сьогоденні.

1. Новый метод трехмерной реконструкции нано- и микро-рельефа по сериям разнофокусных РЭМ-стереоизображений / В. Н. Соколов, О. В. Разгулина, Д. И. Юрковец, М. С. Чернов // Материалы XXIII рос. конф. по РЭМ. Тезисы докладов. – Черногловка, 2010. – С. 78.
2. Determination of the fracture toughness with automatic image processing / J. Stampfl, S. Scherer, M. Gruber, O. Kolednik // Int. J. Frac. – 1996. – P. 139.
3. The IASTED International Conference on signal and image processing / G. N. Vishnyakov, G. G. Levin, K. E. Loshchilov, K. A. Sukhrukov // Fouriersynthtsis profilometry. – 2005. – С. 103–105.
4. Дюков В. Г., Кудеяров Ю. А. Растровая оптическая микроскопия. – М.: Наука, 1992. – 207 с.
5. Степаненко В. А. Растровая и трансмиссионная стереоскопическая фрактография усталостных изломов // Пробл. прочности. – 1979. – № 12. – С. 89–91.
6. Кожан В. П., Корній В. В., Русин Б. П. Реконструкція форми поверхні матеріалів за їх зображеннями // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». «Автоматика, вимірювання та керування». – 2005. – № 530. – С. 116–120.
7. Zheltov S. Yu., Knyaz V. A., Stepanyants D. G. Automated photogrammetric system for photorealistic skull 3'D reconstruction: Videometrics and Optical Methods for 3'D Shape Measurements // Proceeding of SPIE. – 2001. – 4309. – P. 336–345.
8. Степаненко В. А. Метод та практичне застосування стереоскопічної фрактографії // Металознавство та обробка металів. – 1995. – № 1 – С.51–54.
9. Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology. – London: Academic Press., 1992. – P. 329.
10. Дорожинський О. Л., Тукай Р. Фотограмметрія. – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 330 с.
11. Рудзит Я. А., Кризберг Ю. А. Шероховатость поверхностей // Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. – Зинате, 1983. – С. 55.
12. Simov S., Simova S. Electron microscope study of surface topography by geometrical determination of metric characteristics of surface elements // J. of Microscopy. – 1985. – 137. – Pt. 1. – P. 47–55.
13. Дуда Р., Харп П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976. – 511 с.
14. Robinson G. M., Perry D. M., Peterson R. W. Optical interferometry of surfaces // Sci. Am. – 1991. – 265. – P. 67-71.
15. Whitehouse D. Handbook of Surface Metrology. – Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1994. – 988 p.
16. Zolochevkaja O. V., Gnalovskij C. O. A holographic interferometer on the basis of multimode light guiding bundles // Proceedings SPIE. – 1995. – P. 694–697.
17. Maune M. Photogrammetric Self-Calibration of Scanning Electron Microscopes // Photogrammetric Eng. and Remote Sensing. – 1976. – 42, № 9. – P. 1161–1172.
18. Ковалев А. А., Сухоруков К. А. Восстановление формы волнового фронта при больших изменениях фазы // Измерит. техника. – 2004. – № 4 – С. 17–19.
19. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Степанов А. А. Новые методы обработки изображений // НЗНТ. Сер.: Авиационные системы. – 1992. – № 4. – С. 21.
20. Мельник В. Н., Соколов В. Н. Некоторые вопросы стереофрактографической обработки РЭМ-снимков // Изв. РАН. Сер. физ. – 1992. – С. 122–126.
21. Голубев В. Исследование телевизионных методов обработки изображений в растровой электронной микроскопии: Автореф. дис. ... канд.техн.наук. – М.: Машиностроение, 1980. – 20 с.
22. Пуятин Е. П., Аверин С. И. Обработка изображений в робототехнике. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.



23. Л. Крейг. Практическая обработка изображений на языке Си. – М.: Мир, 1996. – 416 с.
24. Analysis of film coating thickness and surface area of pharmaceutical pellets using fluorescence microscopy and image analysis / M. Andersson, B. Holmquist, J. Lindquist et al. // J. Pharm. Biomed. – 2000. – 22 – P. 325–339.
25. Стась О. М., Гаврилюк В. П. Комп'ютерні методи дослідження в металографічному аналізі // Методи дослідження та контролю якості металів. – 2000. – № 1-2. – С. 48–52.

The paper presents a comprehensive analysis of modern optical investigation methods of material micro- and macrosurfaces. Possibilities and evaluation of modern software for computer investigation methods at metallographic image processing are shown. High resolution and particularly great focal depth, simplicity of preparation of the objects of investigation, broad capabilities of elemental analysis at application of different systems for recording X-ray radiation allow a successful application of the methods of micro- and macrographic analysis in materials science investigations to study the structure and elemental composition of the surfaces of wear, friction, fracture, corrosion, chemical interaction and inclusions. Digital processing of images allows an essential enhancement of the capabilities of conducting microscopic studies.

Keywords : fractography, surface topology, electronic microscopy, metallographic images, microstructure

Надійшла до редакції
20.03.2014

КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ И ВЫСТАВОК ПО НК В 2014 Г.

Наименование	Дата и место проведения	Контакты
Неразрушающий контроль аэрокосмических материалов и конструкций	12.05–14.05 Сент-Луис/США	www.asnt.org
8-я Международная конференция «Сварочные материалы»	16.06–18.06 Киев/Украина ИЭС им. Е. О. Патона	www.patonpublishinghouse.com
11-я Международная конференция по неразрушающему контролю и микроанализу для диагностики и сохранения культурного и экологического наследия – Искусство 2014	11.06–13.06 Мадрид/Испания	www.art2014.net
21-й Международный симпозиум румынской ассоциации неразрушающего контроля	11.06–13.06 Мамайя/Румыния	www.aroend.ro
5-я Международная конференция КАНДУ по техническому контролю в процессе эксплуатации и неразрушающему контролю в Канаде – 2014	20.06–23.06 Торонто/Канада	www.events.cinde.ca
Неразрушающий контроль на Дальнем Востоке – 2014	20.06–23.06 Ченгу/Китай	www.fenndti.com
53-я Ежегодная британская конференция по неразрушающему контролю – НК 2014	09.09–11.09 Манчестер/Англия	www.bindt.org
11-я Европейская конференция по неразрушающему контролю	06.10–10.10 Прага/Чехия	www.ecndt2014.com