



## МЕТОДИ ФОТОГРАМЕТРИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ І КАЛІБРУВАННЯ РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ

Описаны два метода фотограмметрической обработки растрово-электронно-микроскопических (РЕМ) изображений. В первом методе постулируется строго параллельная (перспективно-аффинная) проекция. Рассмотрен вариант применения плоской тестовой сетки с дискретностью 200 л/мм. Во втором методе рассматриваются особенности фотограмметрической обработки РЕМ-изображений, базирующейся на применении проективных преобразований с возможностью оценки по МНК. В основу этого метода положено векторную интерпретацию преобладающих соотношений проективной геометрии. Он рассчитан на использование пространственного тест-объекта. Кратко описан пространственный тест-объект пирамидальной формы, который впервые был апробирован в физико-техническом институте города Брауншвайг (Германия).

Two methods of photogrammetric processing of scanning electron microscopy (SEM) images are described. In the first method parallel (forward-affine) projection is strictly postulated. A variant of the application of the flat test grid with discreteness 200 l/mm is considered. The second method deals with photogrammetric processing of SEM images based on the application of projective transformations with least square estimate. The method is based on vector interpretation of prevailing relations of projective geometry. It is designed to use a spatial test object. The spatial test object of pyramidal shape which was first tested in the Physico-Technical Institute in Braunschweig (Germany) is briefly described.

**Постановка проблеми.** Комп'ютерний аналіз зображень, отриманих за допомогою растрової електронної мікроскопії (РЕМ-зображень), сьогодні є одним з актуальних питань науки, особливо в нанотехнологічних дослідженнях [2,11,15]. Зростаючий інтерес до цієї проблеми викликаний загальною тенденцією досліджень на мікронному та субмікронному рівнях [9,10]. При цьому відкриваються нові можливості, які є додатковим стимулом швидкого переходу від традиційних технологій до нових.

Нині метод аналізу РЕМ-зображень широко застосовується при створенні робототехнічних комплексів, систем контролю та управління виробництвом, у медицині, металознавстві, біології, геодезії та інших галузях. Кількісний аналіз РЕМ-зображень мікрооб'єктів дозволяє коректно і достовірно оцінювати багато важливих параметрів [9, 16].

Незважаючи на велику кількість публікацій на цю тему, все ще маємо невирішені проблеми [8]. Насамперед це проблема одержання достовірних кількісних характеристик за РЕМ-зображеннями, зокрема завдяки використанню математично коректних алгоритмів, адаптованих до особливостей досліджуваних мікрооб'єктів [5,7].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, присвячених розв'язанню даної проблеми.** Більшість існуючих на сьогодні систем аналізу РЕМ-зображень не повною мірою реалізують сучасні технічні можливості комплексів РЕМ-ЕОМ, не дають змоги розв'язувати складні прикладні задачі, пов'язані з вивченням мікроструктури [7,8,10].

Щоб розв'язати ці проблеми, автори протягом декількох останніх років працювали над створенням і впровадженням у практику оригінальних алгоритмів і програм цифрової РЕМ-фотограмметрії.

**Предметом дослідження** є математико-фотограмметричні методи опрацювання та калібрування РЕМ-зображень.

**Мета досліджень** – теоретичне обґрунтування процесів фотограмметричного оброблення РЕМ-зображень перспективно-афінної проекції та застосування принципів проективної геометрії РЕМ-мікроскопії.

**Зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями.** Дослідження виконувались у рамках держбюджетної теми (реєстраційний номер 0111U002146).

**Виклад основного матеріалу. I. Випадок строго паралельної (перспективно-афінної) проекції.** Теоретичною основою опрацювання та калібрування РЕМ-зображень є добре відомі у фотограмметрії фундаментальні рівняння колінеарності [3,18], які для випадку перспективно-афінної проекції мають вигляд:

$$F_x = x - \Delta\bar{X} = 0; \quad F_y = y - \Delta\bar{Y} = 0. \quad (1)$$

Рівняння (1) нелінійні. В лінеаризованому вигляді їх можна записати так:

$$\sum_i^n B_{0i} d(q_0, q_x) + L_i = V_i; \quad \sum_i^n B_{xi} d(q_0, q_y) + L_i = V_i,$$

де  $B_{0i}, B_{xi}$  – часткові похідні рівнянь колінеарності  $F_x, F_y$

$$\begin{bmatrix} \Delta\bar{X} \\ \Delta\bar{Y} \\ \Delta\bar{Z} \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = m \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix};$$

$R$  – матриця ротації просторових систем координат;  $x_0, y_0, z_0$  – компоненти вектора трансляції системи координат;  $m$  – масштаб (збільшення РЕМ-знімків);  $x', y'$  – вимірні координати РЕМ-зображень.

Оскільки ці рівняння нелінійні, тому розв'язок ітеративний:



$$F(x) = F_x^0 + \frac{\partial F_x}{\partial(\cdot)} \cdot d_x(\cdot) + \dots;$$

$$F(y) = F_y^0 + \frac{\partial F_y}{\partial(\cdot)} \cdot d_y(\cdot) + \dots, \quad (2)$$

де  $F_x^0, F_y^0$  – наближені значення функцій  $F(x), F(y)$ ;  $\partial F_x/\partial(\cdot), \partial F_y/\partial(\cdot)$  – частинні похідні;  $d_x(\cdot), d_y(\cdot)$  – поправки в наближені значення елементів калібрування та масштабу.

Запишемо рівняння (2) у матричному вигляді:

$$V = L + B_0 \cdot \partial q_0 + B_x \cdot \partial q_x;$$

$$V = B_0 \cdot \partial q_0 + B_x \cdot \partial q_x + L, \quad (3)$$

де  $L = F - F_0$ ;

$$B_0 = \begin{bmatrix} m & 0 & -x' & -\Delta \bar{Y} & -\Delta \bar{Z} & 0 \\ 0 & m & -y' & \Delta \bar{X} & 0 & -\Delta \bar{Z} \end{bmatrix};$$

$$B_x = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & -\beta \\ \alpha & 1 & -\gamma \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\beta \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$dq_0^T = [dx' \quad dy' \quad dm \quad d\alpha \quad d\beta \quad d\gamma]^T;$$

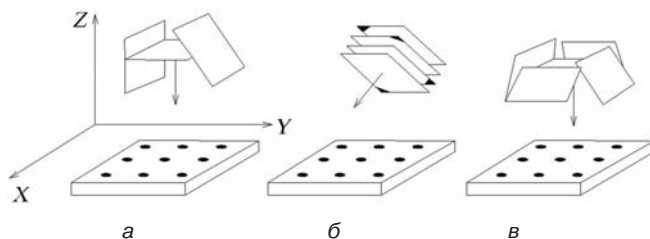
$$dq_x^T = [dX \quad dY \quad dZ]^T.$$

Частинні похідні визначаються за законами математичного аналізу [6,18].

Наведені теоретичні викладки є основою алгоритмізації різних варіантів калібрувальних процедур у РЕМ-фотограмметрії, зокрема варіантів повного та часткового калібрування [18]. Ми обмежились калібруванням просторових елементів взаємного орієнтування РЕМ-стереозображень. Для практичної реалізації пропонуємо два методи: за допомогою плоскої тестової сітки та просторового тестового об'єкта.

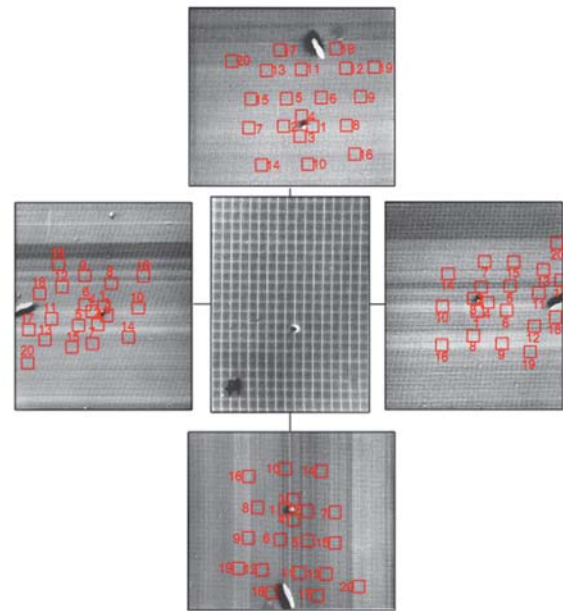
В експериментальних дослідженнях використовувалася тестова сітка (200 лін/мм), виготовлена за нашим замовленням у Державному оптичному інституті імені С. І. Вавілова (С.-Петербург, Росія). Процедуру калібрування за тест-сіткою рекомендуємо здійснювати за трьома принциповими схемами (мал. 1). Застосування конкретної схеми залежить від типу предметного столика РЕМ.

При роботі з РЕМ "Hitachi S-800", за допомогою якого автори проводили основні експериментальні дослідження, було реалізовано схему, зображену на мал. 1, б. На мал. 2 показано конкретну реалізацію даної схеми.



Мал. 1. Принципові схеми фотограмметричного знімання РЕМ-приладами

На РЕМ-зображеннях тестової сітки є характерний артефакт, який використовувався для однозначності її орієнтування на стереоприладі при вимірюванні перехресть тест-сітки (див. мал. 2).



Мал. 2. Серія мікрофотографій тестової сітки з відміченими ідентифікованими точками

Для дослідження було складено відповідну програму на мові C++. Налагодження програми здійснювалось за макетними знімками [4], адаптованими до умов РЕМ-стереознімання. За відомими координатами об'єкта й заданими елементами орієнтування обчислювались макетні координати знімків, потім дійсні значення елементів орієнтування було спотворено: кутові – на 2-5°, лінійні – на 10 мкм. Збіжність ітераційного процесу досягалась за 5-6 ітерацій.

У випадку прийняття умови строго паралельної проєкції для уникнення сингулярності ітерацію виконували в два етапи: спочатку визначали лінійні елементи, а потім кутові, тобто обчислення елементів орієнтування здійснювалось диференційовано.

Результати експериментальних досліджень за макетними РЕМ-знімками були такими: без врахування параметрів дисторсії та стереознімання за традиційною схемою, тобто опрацювання тільки двох знімків стереопари, середньоквадратичні похибки в плані  $\sigma_{x,y}$  становили порядку 1 500 мкм, а середньоквадратична похибка по висоті  $\sigma_z \approx 2 650$  мкм. З урахуванням параметрів дисторсії та за схемою (мал.1, б) середньоквадратичні похибки в плані  $\sigma_{x,y}$  дорівнюють 350 мкм, а по висоті  $\sigma_z$  – 450 мкм.

Таким чином, виконані дослідження дають підставу стверджувати про доцільність застосування калібрувальних схем, зображених на мал. 1. Вони дають змогу підвищувати точність у 50-80 раз.

**II. Фотограмметричне опрацювання РЕМ-зображень у проєктивних координатах.** Теорію застосування у фотограмметрії проєктивних координат розробив Ю. М. Трунін [13].



Фотограмметричне оброблення РЕМ-зображень зазвичай виконується в два етапи.

На першому етапі визначаються віртуальні координати точок фотографування ( $X_S, Y_S, Z_S$ ) і коефіцієнти проєктивних перетворень ( $\gamma_1$  та  $\gamma_2$ ). Для цього потрібно знати шість опорних точок у предметній координатній системі, які не повинні лежати в одній площині. Другий етап полягає в розв'язанні прямої фотограмметричної засічки – визначенні скалярів  $N$  просторових координат  $x, y, z$ .

Скажімо, задано чотири опорних одиничних вектори-напрямки на точки в системі координат:

$$\bar{R}_i = (X_i, Y_i, Z_i)^T, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Необхідно, щоб задані напрямки були по три некомпланарними. Здійснимо фотограмметричні вимірювання координат визначуваних і чотирьох опорних точок  $x_i, y_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ). Якщо за початок координат прийняти вершину зв'язки – точку, яка не лежить у площині об'єкта, то вектори  $\bar{r}_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) та  $\bar{r}$ , які проходять через початок координат і точки знімка ( $x_i, y_i$ ) та ( $x, y$ ), можна задати через одинорідні координати, прийнявши, що  $z = \text{const} = 1$ :

$$\bar{r}_i = [x_i, y_i, 1]^T; \quad \bar{r} = [x, y, 1]^T.$$

Будь-який вектор  $\bar{r}$  можна розкласти за трьома некомпланарними векторами:

$$\rho_i \bar{r}_i = A_1 \xi_1 \bar{R}_1 + A_2 \xi_2 \bar{R}_2 + A_3 \xi_3 \bar{R}_3, \quad (4)$$

де  $\rho$  – довільний множник, що не дорівнює нулю;  $\bar{r}_i$  – вектор, який визначає положення точки на знімку;  $A_1, A_2, A_3$  – векторно-скалярні добутки;  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  – проєктивні координати виміряних на знімку опорних точок;  $\bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{R}_3$  – вектори, що визначають напрямки на базисні точки.

Запишемо рівняння (4) у розгорнутому вигляді:

$$\begin{aligned} \rho_i \bar{r}_i &= (\bar{R}_2 \times \bar{R}_3) \cdot \bar{R}_4 \frac{(\bar{r}_2 \times \bar{r}_3) \cdot \bar{r}_i}{(\bar{r}_2 \times \bar{r}_3) \cdot \bar{r}_4} \cdot \bar{R}_1 + \\ &+ (\bar{R}_3 \times \bar{R}_1) \cdot \bar{R}_4 \frac{(\bar{r}_3 \times \bar{r}_4) \cdot \bar{r}_i}{(\bar{r}_3 \times \bar{r}_4) \cdot \bar{r}_4} \cdot \bar{R}_2 + \\ &+ (\bar{R}_1 \times \bar{R}_2) \cdot \bar{R}_4 \frac{(\bar{r}_1 \times \bar{r}_2) \cdot \bar{r}_i}{(\bar{r}_1 \times \bar{r}_2) \cdot \bar{r}_4} \cdot \bar{R}_3. \end{aligned} \quad (5)$$

У другому рівнянні системи (2) невідомими є  $X_S, Y_S, Z_S$  – координати центру проєкції та  $\gamma_1, \gamma_2$  – коефіцієнти. Для їх визначення рівняння (5) лінеаризується:

$$a_{1i} \delta X_s + a_{2i} \delta Y_s + a_{3i} \delta Z_s + a_{4i} \delta \gamma_1 + a_{5i} \delta \gamma_2 + l_i = v_i,$$

де  $a$  і  $\gamma$  – частинні похідні за відповідними змінними виразу (4).

Задача вирішується за МНК.

У праці [12] пропонується визначати просторові координати у системі координат тест-об'єкта за традиційною схемою прямої фотограмметричної засічки:

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{S(i,j)} \\ Y_{S(i,j)} \\ Z_{S(i,j)} \end{pmatrix} + N \begin{pmatrix} \bar{X}_{(i,j)k} \\ \bar{Y}_{(i,j)k} \\ \bar{Z}_{(i,j)k} \end{pmatrix},$$

де індекси  $i, j$  відповідають лівій і правій точці фотографування;  $\bar{X}_{(i,j)k}, \bar{Y}_{(i,j)k}, \bar{Z}_{(i,j)k}$  – просторові фотограмметричні координати  $k$ -ї точки відповідно на  $i$ -му та  $j$ -му знімках. Їх розраховують як функції однорідних проєктивних координат і коефіцієнтів  $\gamma_1, \gamma_2$  [1,12].

Компоненти скалярного множника  $N$  вираховуються за відомими формулами, які, наприклад, для першого та другого знімків стереопари мають вигляд [3]:

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{\bar{X}_{s2} \cdot \bar{Y}_2 - Y_{s2} \cdot \bar{X}_2}{\bar{X}_1 \bar{Y}_2 - \bar{Y}_1 \bar{X}_2}; \quad N_y = \frac{Y_{s2} \cdot \bar{Z}_2 - Z_{s2} \cdot \bar{Y}_2}{\bar{Y}_1 \bar{Z}_2 - \bar{Z}_1 \bar{Y}_2}; \\ N_z &= \frac{Z_{s2} \cdot \bar{X}_2 - X_{s2} \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \bar{X}_2 - \bar{X}_1 \bar{Z}_2}; \quad N_{\text{ср}} = \frac{N_x + N_y + N_z}{3}. \end{aligned}$$

Перевагами даного методу оброблення РЕМ-зображень є:

- 1) строгий розв'язок задачі;
- 2) можливість розв'язку при відсутності координатних міток на РЕМ-знімках;
- 3) розв'язок задачі при наявності спотворень елементів внутрішнього і зовнішнього орієнтування знімків, які можуть мати будь-яке значення, а також рівномірної та нерівномірної деформації фотоматеріалів, а ще інструментальних похибок стереоприладів.

**III. Нанотехнології – сучасні можливості отримання РЕМ-просторових тест-об'єктів.** Дамо стислий опис 3D-калібрувального тест-об'єкта, який вперше було виготовлено у Фізико-технічному інституті (м. Брауншвайг, Німеччина) із застосуванням нанотехнології за методикою FIB-фрезерування (FIB – сфокусований пучок іонів) [17]

У цьому методі використовуються сфокусовані пучки іонів галію, які здатні розпилювати атоми оброблювального зразка. Цей принцип широко використовується у FIB-приладах для створення довільних тривимірних мікрооб'єктів. FIB дозволяє отримувати просторову мікроструктуру в нанометровому діапазоні.

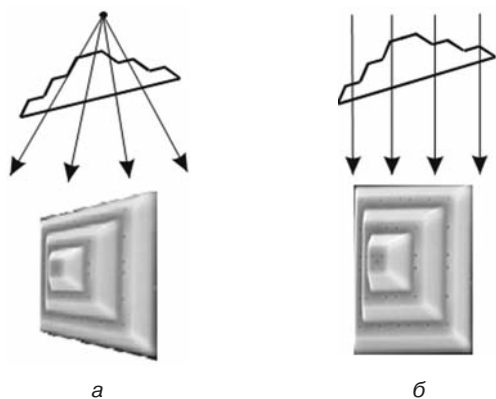
Використання FIB дає можливість обробляти поверхню зразка високопрецизійно, наприклад, можна видалити шар з поверхні до глибини, рівної атомному розміру [18], при цьому зовсім не торкаючись сусіднього шару. Шорсткість поверхні зразка після оброблення іонним пучком становить менше мікрона. FIB дозволяє також генерувати вторинні електрони, які використовуються для осідання. Якщо металоорганічним газом, наприклад  $W(CO)_6$  (гексакарбоніт вольфраму), заповнити камеру, то сформується побічний продукт, який сорбується на поверхні. Це дасть змогу отримати пірамідальну структуру. Осаджений продукт є шаром металу, зазвичай це W чи Pt.

Виготовлений за такою методикою 3D-тест-об'єкт матиме пірамідальну форму з розмірами  $6 \times 6$  мкм у плані та 3 мкм по висоті (мал. 3). Тест-об'єкт з такими параметрами може використовуватися для калібрування РЕМ при збільшеннях від 8 000 до 20 000 крат. На тест-об'єкті на трьох рівнях нанесено 38 контрольних точок (наномаркерів), які фіксуються методом FIB-фрезерування.



Мал. 3. Пірамідальний тест-об'єкт

Експериментальні дослідження [17] підтвердили досить високу точність калібрування. Методикою калібрування передбачалось отримання 10-ти знімків з кроком нахилу  $5^\circ$ . Спільне оброблення за МНК дозволило отримати таку точність:  $m_\varphi=0,643^\circ$ ,  $m_\omega=0,654^\circ$ ,  $m_\kappa=0,18^\circ$ . Відносна похибка по висоті порядку 0,002, а в плані – 0,9 пікселя.



Мал. 4. Вигляд центральної (а) та паралельної (б) проєкції при використанні тривимірного тест-об'єкта

Фотограмметричне опрацювання РЕМ-зображень здійснювалось з апріорного постулювання строго паралельної проєкції, що, на думку авторів, породжує методичні помилки. Очевидно, застосування фотограмметричного опрацювання зображень у проєктивних координатах (див. опис у п. II) дозволяє уникнути таких обтяжень.

### Література

1. *Анализ и разработка способов аналитической обработки снимков с неизвестными элементами ориентирования* / Нгуен Зы Ханг: монография. – М.: МИИГАиК, 1988. – 107 с.
2. *Гольдштейн, Р.В.* Методы и метрологическое обеспечение механических испытаний нано- и микромасштабных объектов, материалов и изделий нанотехнологий // Р.В. Гольдштейн, А.В. Ченцов, Р.М. Кадушников, Н.А. Штуркин // Российские технологии. – 2008. – Т. 3. – № 1. – С. 114-124.
3. *Дорожинський, О.Л.* Фотограмметрія: підручник /

О.Л. Дорожинський, З. Тукай. – Л.: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2008. – 330 с.

4. *Дубиновский, В.Б.* Калибровка снимков / В.Б. Дубиновский. – М.: Недра, 1982. – 224 с.

5. *Іванчук, О.* Дослідження величин геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ DSM-960A (CARL Zeiss, Німеччина) та точності їх врахування / О. Іванчук, Т. Барфельс, Я. Геєр, В. Гегер // Геодез., картогр. і аерофотознім: міжвід. наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 78. – С. 120-126.

6. *Корн, Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 681 с.

7. *Мельник, В.М.* До теорії РЕМ-фотограмметрії // В.М. Мельник, В.У. Волошин // Вісн. геодез. та картогр. – 2006. – № 5. – С. 26-29.

8. *Мельник, В.М.* Растрово-електронна стереомікрофрактографія: монографія / В.М. Мельник, А.В. Шостак. – Луцьк: РВВ "Вежа" ВНУ ім. Лесі Українки. – 2009. – 469 с.

9. *Петров, М.С.* Переносной программно-аппаратный комплекс для экспрессной оценки остаточного ресурса сварных соединений по структурному фактору / М.С. Петров, А.Л. Козерчук, Р.М. Кадушников [и др.] // Цифровая микроскопия: матер. шк.-сем. – Екатеринбург, 2002. – С. 4-7.

10. *Соколов, В.Н.* Анализ РЕМ-стереоизображений // В.Н. Соколов, В.Н. Мельник, Д.И. Юрковец // Изв. РАН, сер. физическая. – 1996. – Т. 60. – № 2. – С. 55-64.

11. *Степаненко, В.А.* Растровая и трансмиссионная стереоскопическая фрактография усталостных изломов / В.А. Степаненко // Проблемы прочности. – 1979. – № 12. – С. 89-91.

12. *Трубина, Л.К.* Алгоритм обработки микроизображений, полученных с использованием сканирующего электронного микроскопа / Л.К. Трубина // Матер. науч.-техн. конф. СГГА. – 2002. – № 3. – С. 62-64.

13. *Трунин, Ю.М.* Некоторые вопросы теории фотограмметрии // Изв. вузов. Геодез. и аэрофотосъем. – 1959. – № 5. – С. 34-37.

14. *Урмаев, М.С.* Метод наименьших квадратов при обработке астронегативов с использованием проєктивных преобразований // М.С. Урмаев, В.М. Безменов // Изв. вузов. Геодез. и аэрофотосъем. – 1991. – № 2. – С. 49-58.

15. *Ясний, П.В.* Автоматизированный анализ поверхностных трещин у конструктивных элементах / П.В. Ясний, П.О. Марущак, І.В. Коваленко, Р.Т. Бішак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – № 6. – С. 83-87.

16. *Ясний, П.В.* Автоматизована оцінка полів деформації методом координатних сіток / П.В. Ясний, І.В. Коваленко, П.О. Марущак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – № 2. – С. 130-136.

17. *Ritter, M.* SEM/FIB Stage Calibration With Photogrammetric Methods / M. Ritter, M. Hemmleb, P. Faber, H. Hohenberg // Federal Institute for Materials and Testing (BAM). – Berlin, 2007. – P. 404-412.

18. *Schenk, T.* Digital photogrammetry / T. Schenk. – Terra Science. – 1999. – 500 p.

Надійшла 18.09.14