

УДК 539.2(075.8)

І.М. Козюк, студентка гр. ФМ-91, к.ф.-м.н., Н.О. Балахонова
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНОГРАМ ТОНКИХ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МЕТАЛЕВИХ ПЛІВОК

Анотація. Розглянутий спосіб моделювання електронограм, створених просвічуючим електронним мікроскопом (ПЕМ) у режимі дифракції від тонких полікристалічних металевих плівок, у програмному пакеті MathCad для дистанційних курсів «Діагностика та методи структурного аналізу матеріалів» і «Фізичні та структурні методи дослідження». Виконана оцінка вартості створення зразків та їх дослідження у ПЕМ.

Ключові слова: просвічуючий електронний мікроскоп (ПЕМ), моделювання у MathCad, електронограма, вартість дослідження.

ВСТУП

Для вивчення складу та різних процесів у тонких плівках в Інституті матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського (ІМЗ) вчені та технологи можуть скористатись Центром електронної мікроскопії, який оснащений сучасними приладами:

- скануючим електронним мікроскопом з енергодисперсійним мікроаналізатором РЕМ 106И;
- просвічуючим електронним мікроскопом ПЕМ-У (ПЕМ);
- рентгенофлуоресцентним експресаналізатором хімічного складу "EXPERT 3L".

Зокрема, ПЕМ використовують для досліджень структури та фазового складу тонких плівок, завдяки чому можна отримати нові плівкові композити з широким спектром властивостей (електричних та магнітних, механічних, оптичних тощо). Тому в освітніх програмах бакалаврів (132 Матеріалознавство, 136 Металургія) передбачено виконання лабораторної роботи «Дослідження фазового складу сплавів при електронномікроскопічному аналізі полікристалічних зразків».

Обладнання Центру електронної мікроскопії є дорогівартісним і працюють на ньому сертифіковані інженери ІМЗ, які виконують, у першу чергу, заявки наукових співробітників. Крім того, підготовка зразків для електронних мікроскопів потребує значних технічних зусиль, які при дистанційній освіті в умовах карантину, спричиненому зростанням кількості інфікованих на коронавірус, є складними та вартісними. Тому моделювання у програмному пакеті MathCad дифракційної картини, створеної ПЕМ у тонких полікристалічних металевих плівках, є актуальним.

РОЗРАХУНОК ВАРТОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗРАЗКІВ ДЛЯ ПЕМ ТА ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОНОГРАМ

Основна складність при використанні ПЕМ [1] полягає у виготовленні зразків, товщина яких повинна становити трохи більше мікрона. Існує декілька методів виготовлення зразків для ПЕМ:

для масивних зразків їх стоншують за допомогою:

- хімічного травлення;
- іонного травлення;

- струйного травлення;
- виготовлення тонких плівок здійснюють методами:
 - іонно-променевими;
 - хімічними;
 - електрохімічними;
 - фотолітографічним;
 - термічного (вакуумного) осадження;
 - магнетронного осадження;
 - молекулярно-променевої епітаксії;
 - лазерного розпорошення.

Метод створення зразків обирають із наукових задач і наявності певного типу обладнання. На кафедрі фізичного матеріалознавства та термічної обробки існує ВУП-5М для термічного осадження тонких плівок, який обслуговують лаборант та інженер II категорії. Враховуючи трудомісткість виготовлення одного зразку лаборантом у 1 людину/день та інженером II категорії у 0,5 людину/день та отримання однієї електронограми інженером I категорії у 0,5 людину/день, розрахуємо вартість вказаних робіт, виходячи із середньої заробітної плати інженера I категорії та II категорії у 10010 грн та 9490 грн відповідно, та лаборанта у 6766 грн на місяць (дані заробітної плати з Додатку 3 до наказу «Про встановлення нових посадових окладів з 01 грудня 2021 року»).

Денна зарплата інженерів I та II категорій за 30 днів місяця складає 333,67 грн та 316,33 грн, а лаборанта – 225,53 грн. Тому виготовлення одного зразка для ПЕМ та отримання однієї електронограми в затратах на заробітну плату складає:

$$0,5 \cdot (333,67 + 316,33) + 225,53 = 550,53 \text{ грн.}$$

Оскільки група, зазвичай, складається з 36 студентів і, при виконанні лабораторних робіт на складному обладнанні, ділиться на бригади, то потрібно виготовити та дослідити 12 зразків і витрати на заробітну плату персоналу зростуть

$$12 \cdot 550,53 = 6606,36 \text{ грн.} \quad (1)$$

До розрахунку вартості потрібно додати вартість матеріалів, з яких виготовлені зразки, що зазначена у Табл. 1, та електроенергії, що витрачається на роботу ВУП-5М та ПЕМ. Матеріали зразків обрані таким чином, щоб елементарна комірка металів була кубічною – ОЦК або ГЦК.

Таблиця 1 - Вартість у гривнях 1 гр метала (проволока або стрічка) чистотою 99,9% станом на жовтень 2021 р. [2]

Fe	Co	Ni	Cr	Cu	Ti	V	Mo	W	Ta	Au	Pt
0,3	2,854	0,405	0,376	0,3	0,5	3,0	2,0	0,65	27	1500	1126

Сукупна вартість матеріалів, вагою 10 г, для виготовлення зразків згідно Табл. 1 є

$$3 + 28,54 + 4,05 + 3,76 + 3 + 5 + 30 + 20 + 6,5 + 270 + 15000 + 11260 = 26633,85 \text{ грн.} \quad (2)$$

Розрахунок вартості електроенергії здійснимо, враховуючи електричну потужність ВУП-5М і ПЕМ у 4,5 кВт, тривалість роботи ПЕМ та ВУП-5М у

4 години та вартість електроенергії для побутових споживачів другого класу [3]:

$$4,5 \cdot 0,212 \cdot 4 \cdot 12 \cdot 2 = 91,58 \text{ грн} \quad (3)$$

Остаточна сума виготовлення зразків та електронограм, враховуючи (1)-(3), є:

$$6606,36 + 26633,85 + 91,58 = 33331,79 \text{ грн.} \quad (4)$$

При моделюванні електронограм від зразків використовується тільки ПК з пакетом MathCad, які є в наявності в комп'ютерному класі 509-09. Час моделювання при наявній розрахунковій програмі займає декілька секунд. Збір даних для моделювання – 5 хвилин. Моделювання, на відміну від виготовлення зразків та отримання електронограм на ПЕМ, може проводитись студентами в рамках відповідної лабораторної роботи. Тому витратами на моделювання можна вважати 1 годину роботи ПК [4] та викладача, що проводить заняття.

витрати на електроенергію - $(0,1 + 0,2) \cdot 0,212 = 0,06$ грн

витрати на заробітну плату викладача – $20876,34 \cdot 2 / 600 = 69,59$ грн, тобто разом

$$69,59 + 0,06 = 69,65 \text{ грн.}$$

Економія з використанням моделювання становить 33262,14 грн.

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНОГРАМ

ПЕМ може працювати у режимах дифракції, мікродифракції, світлопольного зображення, темнопольного зображення, режимі високої роздільної здатності при вивченні дефектів кристалічної решітки, режимі великих збільшень при отриманні зображення кристалічної решітки, стереоскопічному режимі та дифракції пучків, що сходяться [1]. У режимі дифракції отримують електронограми, приклад якої зображений на Рис. 1.

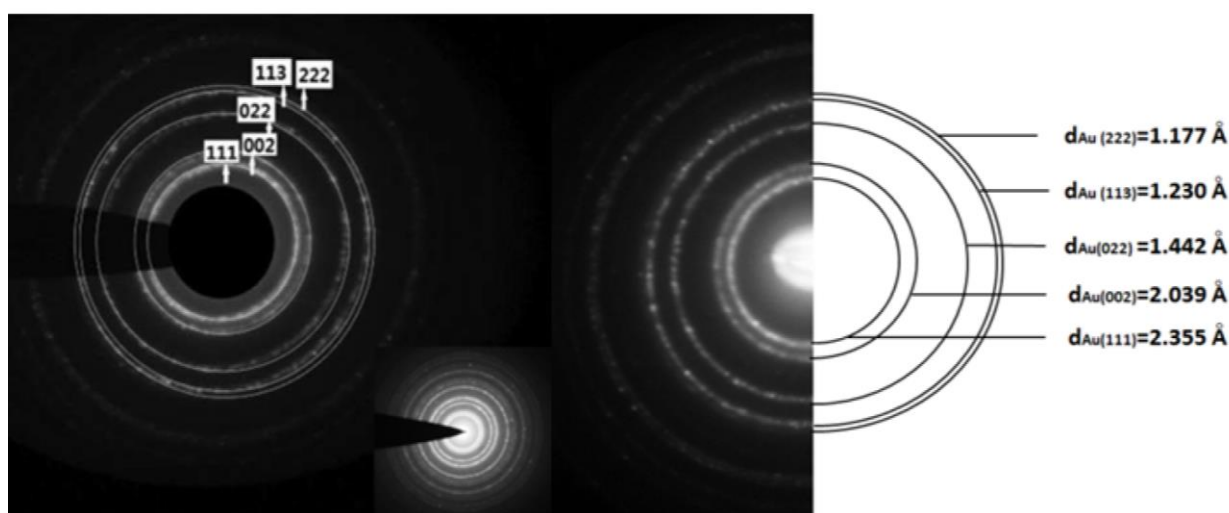


Рисунок 1. Електронограма від тонкої плівки золота та її розшифрування (вказані індекси площин та міжплощинні індекси d_{Au}) [5]

Для моделювання електронограм скористались вже відомим набором дифракційних спектрів [6], в якому є міжплощинні відстані, інтенсивності та індекси площин для металів, наведених у Табл. 1.

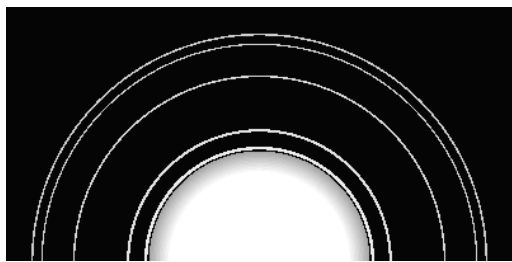


Рисунок 2. Приклад електронограми від плівки Au, змодельованої за допомогою пакету MathCad

Для розрахунку радіусів дифракційних кіл r задавали певну сталу ПЕМ C у одиницях розміру $[C]=\text{Å}\cdot\text{мм}$:

$$r = C/d, \quad (5)$$

і використовували загальновідоме рівняння кола. Для генерування фотографії електронограми користувались відтінками сірого, де ступінь чорноти змінює своє значення від 1 (чорний 100%) до 256 (білий 100%). Інтенсивності кіл задавали відповідно їх значенню для певної площини відбиття. Приклад змодельованої в MathCad електронограми від плівки Au, зображений на рис. 2.

ВИСНОВКИ

Виконана оцінка вартості створення зразків та їх дослідження в ПЕМ для лабораторної роботи «Дослідження фазового складу сплавів при електронномікроскопічному аналізі полікристалічних зразків» показала ефективність використання моделювання електронограм у програмному пакеті MathCad. Це моделювання є першим етапом у створенні відповідної віртуальної лабораторної роботи для дистанційних курсів «Діагностика та методи структурного аналізу матеріалів» та «Фізичні та структурні методи дослідження».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Прилади і методи дослідження плівкових матеріалів: навч. посіб. / І. Ю. Проценко, А. М Чорноус., С. І. Проценко; за зред. І. Ю. Проценка. - Суми: СумДУ, 2007. – 264 с.
- [2] ТОВ "НПП "АКАДЕМПРИЛАД". Мишени и источники испарения. Режим доступу : <http://ukrrospribor.com.ua/?me=89&id=351> — 20.11.2021
- [3] Тарифи для побутових споживачів. ВС Енерджі Інтернейшнл Україна. Режим доступу : <https://vsenergy.com.ua/categories-page/tarifi-dlja-nepobutovih-spozivachiv/> — 20.11.2021
- [4] Потребляемая мощность компьютера с монитором. Режим доступу : <https://compfonyk.com/potreblyaemaya-moschnost-kompyutera-s-monitorom/> — 20.11.2021
- [5] Asadabad M. A. Electron diffraction / MA Asadabad, MJ Eskandari in book “Modern electron microscopy in physical and life sciences” – IntechOpen, - 2016. Режим доступу: <https://www.intechopen.com/chapters/49537> <https://www.intechopen.com/chapters/49537> - 20.11.2021
- [6] Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. — М.: Физ.-мат. лит., 1961. С. 532

Наук. керівник – к.ф.-м.н. Балахонова Н.О.