

Г.О. КНЯЗЬОВА (ПОСТЕЛЬНИК), С.А. КНЯЗЬОВ, М.М. ТКАЧУК, Н.В. ПІНЧУК

ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ РІЗНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ФАЗОВО-СТРУКТУРНИХ СТАНІВ МАТЕРІАЛІВ (ОГЛЯДОВА СТАТТЯ)

У роботі наведений короткий огляд стандартних можливостей рентгенівських методик дослідження матеріалів з наведенням прикладів сучасного виконання елементного та рентгеноструктурного досліджень. Методи рентгенівських досліджень дають можливість виявити елементний та фазово-структурний стан. Завдяки сучасному програмному забезпеченню та електронним базам даних застосування донині складних методик стає простим і більш доступним. Практика взаємодії дослідників показує, що навіть спеціалістам у галузі рентгеноструктурного аналізу не завжди відомі сучасні методики обробки і розшифрування отриманих даних. Можливості та алгоритм дії при дослідженнях можуть бути цікавими для студентів, інженерів, дослідників матеріалознавчого та машинобудівного профілю.

Ключові слова: мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз, рентгенофлуоресцентний аналіз

А.А. КНЯЗЬОВА (ПОСТЕЛЬНИК), С.А. КНЯЗЬОВ, Н.Н.ТКАЧУК, Н.В. ПІНЧУК

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ РАЗНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ФАЗОВО-СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ МАТЕРИАЛОВ (ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ)

В работе приведен краткий обзор стандартных возможностей рентгеновских методик исследования материалов с приведением примеров современного выполнения элементного и структурного исследований. Методы рентгеновских исследований позволяют выявить элементное и фазово-структурное состояние. Благодаря современному программному обеспечению и электронным базам данных применение ранее сложных методик становится простым и более доступным. Практика взаимодействия исследователей показывает, что даже специалистам в области рентгеноструктурного анализа не всегда известны современные методики обработки и расшифровки полученных данных. Возможности и алгоритм действия при исследованиях могут быть интересными для студентов, инженеров, исследователей материаловедческого и машиностроительного профиля.

Ключевые слова: микроскопия, рентгеноструктурный анализ, рентгенофлуоресцентный анализ

Н. КНЯЗИЕВА (POSTELNYK), S. KNIAZIEV, M. TKACHUK, N. PINCHUK

ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF DIFFERENT METHODS FOR STUDYING THE PHASE-STRUCTURAL STATES OF MATERIALS (A REVIEW)

The paper provides a brief overview of the standard capabilities of X-ray techniques for studying materials with examples of modern performance of elemental and structural studies. X-ray research methods make it possible to reveal the elemental and phase-structural state. Thanks to modern software and electronic databases, the use of previously complex techniques is becoming simpler and more accessible. To illustrate the solution of specific problems, several examples of obtaining and decoding diffraction patterns and identifying the phase composition of the coating and ceramic material are given. An example of work in modern specialized software for acceleration and automation of phase identification is shown. For clarity, an example of identifying phases using electronic database cards is presented, which is still used today for manual decoding. The practice of interaction between researchers shows that even specialists in the field of X-ray structural analysis are not always aware of modern methods of processing and decoding the obtained data. The possibilities and algorithm of action in research can be interesting for students, engineers, researchers of materials science and mechanical engineering profile.

Keywords: microscopy, X-ray structural analysis, X-ray fluorescence analysis

Вступ. На теперішній час використовуються численні методи аналізу матеріалів: аналіз будови матеріалів на різних масштабних рівнях (мікроскопія), визначення хімічного складу, різних фізичних властивостей, фізико-механічних характеристик, моделювання методом скінченних елементів структурно-механічних змін [1] тощо. Кожен із методів відповідає за певний аспект будови матеріалу і, як правило, не може бути замінений іншим. Повна інформація про будову і властивості матеріалів досягається при використанні сукупності методів структурного аналізу, які доповнюють один одного. Найбільш численну групу складають методи, в основу яких покладено взаємодію матеріалів із різними видами випромінювання. Це оптична [2–4] і електронна [5] мікроскопія, рентгеноструктурний [6, 7], рентгеноспектральний [8], флуоресцентний аналізи тощо.

В огляді розглянуті переваги та недоліки методів дослідження фазово-структурного стану матеріалів.

Метою роботи є огляд та аналіз найбільш відомих та застосовуваних методів дослідження фазово-структурного стану.

Методи дослідження. Рентгеноструктурні методи дослідження матеріалів знайшли широке застосування завдяки можливості встановлення цими ме-

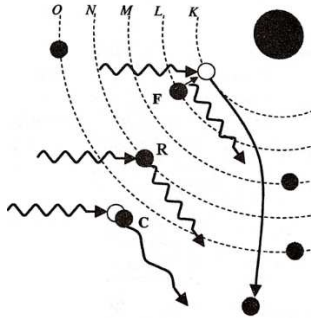
тодами елементного складу, фазового складу та структурних характеристик матеріалу. Будь-який рентгенівський метод аналізу потребує складного високовольтного обладнання. Однак, цей недолік компенсується майже повною відсутністю пробопідготовки, що підвищує продуктивність серійного аналізу [9–12].

Для здійснення аналізу рентгенівськими методами використовують широкий спектр відгуку матеріалу на взаємодію з рентгенівськими променями. Найбільший спектр взаємодії займає випускання флуоресцентного випромінювання і його детектування з метою встановлення елементного складу. Такий спосіб дає можливість встановлювати тисячні долі вагових відсотків елементів починаючи з берилію і до урану, у періодичній системі Д.І. Менделєєва. На жаль, легкі елементи, які розташовані у верхній частині періодичної системи, майже не випускають флуоресцентного випромінювання. Для їх аналізу можливе застосування високоенергетичної ділянки рентгенівського спектру. На цій ділянці фіксується відношення інтенсивностей ліній когерентного

© Г.О. Князьова (Постельник), С.А. Князьов, М.М. Ткачук, Н.В. Пінчук, 2021

(релєєвського) і некогерентного (комптонівського) розсіювання – рис. 1 [13].

Чим легше елемент (чим вище він знаходиться у періодичній системі), тим більше буде ефект різниці інтенсивностей когерентного та некогерентного розсіювання. Тобто такі легкі елементи, які складно встановлювати іншими методами дослідження, проявляють найбільшу чутливість при високоенергетичній взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною.



KLMNO – електронні рівні навколо ядра атома речовини;
F – поглинання фотона, яке супроводжується випусканням флуоресцентного випромінювання;
R – когерентне релєєвське розсіювання;
C – некогерентне (комптонівське) розсіювання

Рисунок 1 – Схематичне уявлення щодо взаємодії рентгенівського випромінювання з електронними оболонками атома речовини, що досліджується [13]

Відомо, що водень, кисень, азот завжди присутні у конструкційних матеріалах з металевою основою, а встановлення їх концентрації становить значний інтерес. Однак, такий метод має і суттєві недоліки. Для його реалізації необхідні еталони для встановлення взаємозв'язку між відношенням інтенсивностей некогерентного і когерентного розсіювання та концентрацією елемента. Такими еталонами можуть бути рівноважні хімічні з'єднання з чіткою стехіометрією.

Таким чином, методи рентгенофлуоресцентного аналізу (РФА) на сьогоднішній час є найбільш експресними, не залишають слідів взаємодії між аналізатором та речовиною, що досліджується, і наряду із застосуванням рентгенівської дифракції та високоенергетичної взаємодії достатньо точно забезпечують аналіз широкого спектру елементів.

Слід зазначити, що сам РФА поділяється на хвильодисперсійнорентгенофлуоресцентний аналіз (ХДРФА) та енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний аналіз (ЕДРФА). ЕДРФА дає можливість встановлювати наявність сірки, фосфору, кремнію та алюмінію у зразках матеріалу. ХДРФА використовує широкополосне збудження флуоресценції зразка і селективне детектування, що іноді супроводжується втратою інформації при селектуванні.

ЕДРФА використовує селективне збудження флуоресценції зразка і широкополосне детектування. Широкополосне збудження флуоресценції зразка визначає, що блок формування первісного спектру майже відсутній і на зразок спрямоване випромінювання рентгенівської трубки, що не зазнає змін. Це забезпечує високу інтенсивність вторинного випромінювання хімічних елементів зі зразка. Однак, при

такій схемі вторинне випромінювання має пройти довгий шлях до кристалу-аналізатора і детектора. Для зменшення втрат на поглинання аналітичного сигналу камера ХДРФА спектрометра вакуумується, що ускладнює їх конструкцію.

Спектрометри ЕДРФА використовують широкополосне детектування, при якому детектор одночасно реєструє фотони усіх енергій [14]. Сам детектор розміщений на відстані декількох міліметрів від зразка, що виключає необхідність вакуумування. За такою схемою виробляють портативні рентгенівські спектрометри, що аналізують поверхню матеріалу без необхідності вирізки і підготовки зразка.

Рентгеноструктурний аналіз є складним методом аналізу як у плані обладнання для його реалізації, так і у плані розуміння фізичних аспектів взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною і тлумачення отриманих результатів. Повне володіння цим методом можливе на базі задовільної кваліфікації матеріалознавців у поєднанні зі знанням багатьох аспектів фізики твердого тіла, кристалографії та оптики рентгенівського випромінювання [15]. Аналіз заснований на явищі дифракції рентгенівського випромінювання на кристалічній решітці матеріалу. В основі явища лежить регулярне розташування атомів у просторі. Тому рентгеноструктурний аналіз – це спосіб ідентифікації цього розташування, тобто аналіз кристалічної решітки і визначення її характеристик [16, 17].

Зазвичай сучасна рентгенівська зйомка здійснюється за принциповою схемою фокусування за Бреггом-Брентано (рис. 2).

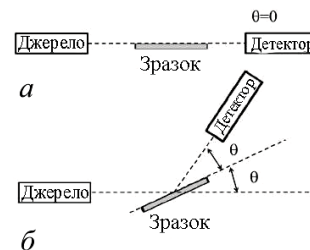


Рисунок 2 – Принципова схема зйомки рентгенограм на дифрактометрі:

а – положення юстирування; б – положення зйомки

При використанні зйомки в такій геометрії джерело рентгенівського випромінювання нерухоме (рентгенівська трубка), а зразок і детектор обертаються навколо вертикальної осі (перпендикулярно площині рисунка). При повороті зразка на кут θ детектор має повернутися на кут 2θ відносно нульового положення. Тому іноді в літературі замість кута θ зустрічається кут 2θ [18]. У процесі запису фіксується інтенсивність відбитого випромінювання і кут θ . У приладах старої конструкції на записі присутні вертикальні штрихи, що фіксуються автоматично лічильником кута для полегшення відліку 2θ . Сучасні прилади виробляють запис рентгенограми в цифровому вигляді з наступною побудовою графічного файлу.

Реалізація якісного фазового аналізу здійснюється безпосередньо на основі формули Вульфа-Брегга

$$2d \sin\theta = \lambda n, \quad (1)$$

де d – міжплощинна відстань, А;

θ – кут ковзання, °С;

λ – довжина хвилі, А;

n – порядок дифракційного максимуму.

Порядок здійснення фазового аналізу [19]:

1. Визначити кутове положення інтерференційної лінії θ . Принцип визначення кута проілюстрований на рис. 2.6 (б) і полягає в тому, що на рентгенограмі потрібно провести лінію рівня фону і опустити на неї перпендикуляр з положення максимуму інтерференційної лінії. При комп'ютерному визначенні координати максимуму обирається максимальна точка профілю лінії.

2. За формулою Вульфа-Брегга розрахувати значення d/n для всіх наявних на рентгенограмі ліній.

3. Визначити інтенсивність ліній по відношенню до найбільш інтенсивної лінії у відсотках.

4. На підставі інформації про хімічний склад зразка, умови його отримання та / або обробки визначити найбільш імовірні фази.

5. Використовуючи довідкові дані, порівняти

отримані значення d/n із табличними значеннями для передбачуваних фаз.

6. Наявність фази можна вважати встановленою, якщо отримано збіг експериментальних і табличних значень d/n мінімум з трьома найбільш інтенсивними лініями. Нижче буде розглянуто приклад, коли можна обмежитися меншою кількістю ліній.

Для здійснення фазового аналізу натепер використовуються електронні бази даних, які дають можливість автоматичного порівняння експериментальних і теоретичних даних (електронна база дифракційних даних (картотека ASTM) [20], програма Match3! [21]). У деяких особливих випадках фахівець сам формує картотеку. На рис. 3 наведено приклад картки нітриду хрому Cr_2N , а на рис. 4, 5 – приклади фазової ідентифікації для випадку фази Cr_2N , яка отримана вакуумно-дуговим випаровуванням у нерівноважних умовах на сталій підкладці, що призвело до зміщення ліній внаслідок наявності напруженого стану та мікродфектів. Видно, що багато ліній зміщені відносно даних, які взяті з наявної картотеки.

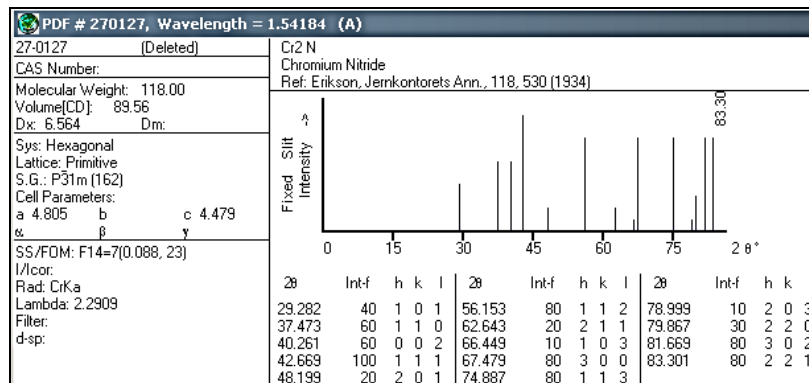


Рисунок 3 – Картка нітриду хрому Cr_2N

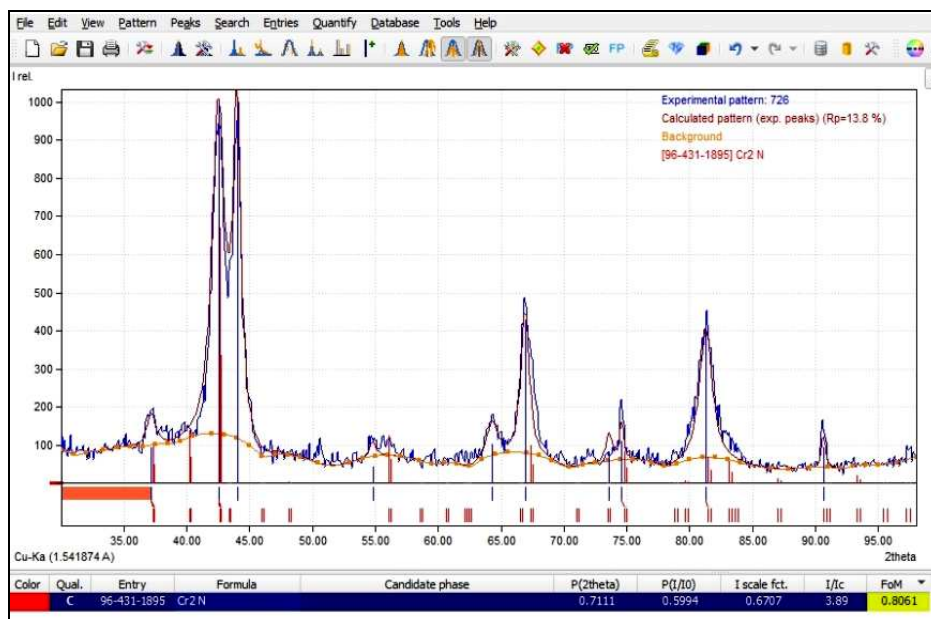


Рисунок 4 – Фазовий аналіз рентгенограми покриття Cr_2N на сталій підкладці у програмі Match3! (наведено реконструкцію і ідентифікацію фаз за дифракційними лініями)

Алгоритм дії простий. Масив даних завантажується у програму, яка реконструює дифрактограму у

графічному вигляді (рис. 4). Далі дослідник у правому вікні обирає тип виділення елементу (обов'язково присутній або відсутній, присутній опційно тощо). Після автоматичного порівняння і аналізу даних ліній за кутами програма розставляє штрихові маркери ліній фаз, що пропонуються для ідентифікації з певною долею вірогідності. Результат з'являється нижче реконструйованого зображення дифрактограми. На рис. 4 – це одна фаза Cr_2N , хоча часто на практиці програма пропонує декілька варіантів.

Труднощі при аналізі багатофазних систем становить те, що інтенсивність відбитого проміння розподіляється між усіма фазами, присутніми у зразку. Тому чим більше фаз присутні в зразку, тим інтенсивність усіх ліній на рентгенограмі менше. Приклад наведений на рис. 6. Така дифрактограма складно розшифровується у автоматичному режимі і потребує ручного втручання або ручного групування ліній. Однак все рівно розшифрування такої складної системи за допомогою рентгенівського фазового аналізу є найбільш доступним, об'єктивним та експресним методом. Так, наприклад ідентифікація фаз методом дифракції електронів потребує складної підготовки зразків і більш дорогого обладнання (наявність електронного мікроскопу). Чим більше фаз присутні у зразку, тим інтенсивність усіх ліній на рентгенограмі менша.

На рентгенограмі (див. рис. 6) піки 34, 35, 38 – це лінії SiO_2 ; піки 4, 11, 12, 14, 16, 20–24, 26, 27, 30, 31, 33,

35–38, 40 – лінії Al_2O_3 ; піки 5, 7, 9–11, 13, 18–21, 23–34, 37, 38, 41, 42 – це лінії Ca_2SiO_4 . Хоча багато ліній за положеннями окремих фаз співпадають, це не заважає здійснити ідентифікацію наявних фаз і навіть здійснити їх кількісну оцінку. Звичайно, якщо б наведений зразок був незнайомий досліднику, для зменшення часу по ідентифікації довелося би застосувати елементний аналіз.

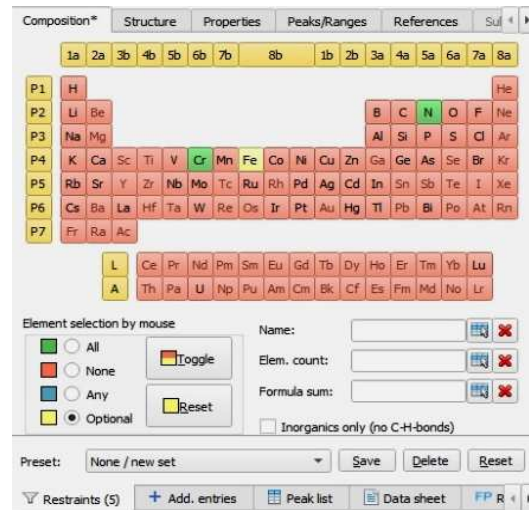


Рисунок 5 – Вибір елементів, що припустимо (відомо) складають систему фаз у програмі Match3!

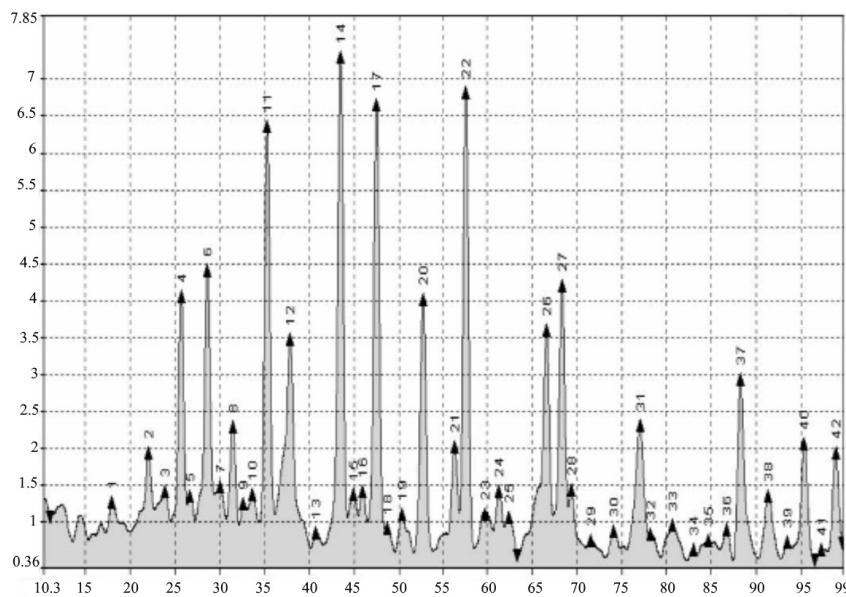


Рисунок 6 – Рентгенограма оксидної кераміки

Маючи інформацію за фазовим складом, фахівець-матеріалознавець порівняно легко може спрогнозувати властивості матеріалу без додаткових досліджень, однак це питання виходить за рамки обмеженої статті.

Висновки. Таким чином, сучасні дослідження у галузі матеріалознавства мають справу зі складним комплексом багатоелементного матеріалу, у якому у свою чергу формуються декілька фаз чи структурних складових. Завдяки добрій вивченості властивостей окремих фаз та структур, маючи повну картину фазово-структурного складу, можна прогнозувати властивості матеріалу. Один зі шляхів вирішення цього питання полягає у застосуванні широкого спектру мето-

дик рентгенівських методів дослідження, які можуть застосовуватись не тільки у науково-дослідницьких програмах, але стати на озброєння при вирішенні рутинних завдань оцінки контролю якості сировини, вхідних матеріалів і готових виробів.

Подяка. Ця робота була фінансово підтримана науково-дослідною роботою № ДР 0121U107498.

Список літератури

- Курушин А. А. *Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL*. М.Я: «One-Book», 2016. 376 с.
- Анисович А. Г., Румянцев И. Н. *Практика металлографического*

- исследования материалов. Минск: Беларуская навука, 2013. 221 с.
- George F. Vander Voort. *Metallography: principles and practice*, American Society for Metals. *ASM International*. 2000. P. 769.
 - May I. Le, James L. McCall P. M. French. *Metallography in Failure Analysis*. Springer US, 1978. 302 p.
 - Debbie J Stokes Principles and Practice of Variable Pressure. *Environmental Scanning Electron Microscopy (VP - ESEM)*, 2008, 230 p.
 - Kovalev A.A., Tishchenko L.A., Shashurin V.D. et al. Application of X-ray Diffraction Methods to Studying Materials. *Russ. Metall*. 2017. P. 1186–1193.
 - Dittrich H., & Bieniok A. Structural Properties: X-Ray and Neutron Diffraction. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, Measurement methods*. 2009. P. 718–737.
 - Zimmermann P., Peredkovd S., Macarena Abdalac P., DeBeerd S., Tromp M., Müller Ch., Jeroen A. van Bokhoven. Modern X-ray spectroscopy: XAS and XES in the laboratory, *Coordination Chemistry Reviews* 423. 2020. P. 213466.
 - Lachance G.R., Claisse F. *Quantitative X-ray Fluorescence Analysis: Theory and Application*, Gerald R. Fernand Claisse. Wiley Chichester; New York, 1995. 402 p.
 - Zimmermann P., Peredkovd S., Macarena Abdalac P., DeBeerd S., Tromp M., Müller C., J. A. van Bokhovenae. Modern X-ray spectroscopy: XAS and XES in the laboratory. *Coordination Chemistry Reviews*. 2020. Vol. 423. P. 2–28.
 - Van Bokhoven J. A., Lamberti C. *X-ray absorption and X-ray emission spectroscopy: theory and applications*. John Wiley & Sons Ltd, 2016. 845 p.
 - Michael Hollas J. *Modern Spectroscopy, Fourth Edition*. John Wiley & Sons Ltd, 2004, 452 p.
 - Михайлов И.Ф., Батурич А.А., Михайлов А.И. *Рентгеновские методы анализа состава материалов: монография*. Х.: «Підручник НТУ «ХПІ»», 2015. 204 с.
 - Ellis A.T. *Energy-dispersive x-ray fluorescence analysis using x-ray tube excitation. Handbook of x-ray spectrometry*. Second Edition, revised and expanded. 2001, ch.3.
 - Waseda Y., Matsubara E., Shinoda K. *X-Ray Diffraction. Crystallography Introduction, Examples and Solved Problems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 322 p.
 - Winholtz R. A., Rogante M. Residual Stresses: Macro- and Microstresses. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. 2001. P. 8148-8151.
 - Bolognesi Donato G. H., Magnabosco R. Modeling and Characterization of Residual Stresses in Material Processing. *Comprehensive Materials Processing*. 2014. Vol. 2. P. 219–233.
 - Guinebrière R. *X-Ray Diffraction by Polycrystalline Materials*. Wiley-ISTE, 2007, P 384
 - Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. *Рентгенографический и электронно-оптический анализ. 3-е изд. доп. и перераб.* М.: МИСИС, 1994. 328 с.
 - Веб-сайт <http://www.icdd.com>
 - Веб-сайт <https://www.crystalimpact.com/match/>
 - SAPR COMSOL. M.Ya: «One-Book», 2016. 376 p.
 - Anisovich A. G., Romyanczeva I. N. *Praktika metallograficheskogo issledovaniya materialov*. Minsk: Belaruskaya navuka, 2013. 221 s.
 - George F. Vander Voort. *Metallography: principles and practice*, American Society for Metals. *ASM International*. 2000. P. 769.
 - May I. Le, James L. McCall P. M. French. *Metallography in Failure Analysis*. Springer US, 1978. 302 p.
 - Debbie J Stokes Principles and Practice of Variable Pressure. *Environmental Scanning Electron Microscopy (VP - ESEM)*, 2008, 230 p.
 - Kovalev A.A., Tishchenko L.A., Shashurin V.D. et al. Application of X-ray Diffraction Methods to Studying Materials. *Russ. Metall*. 2017. pp. 1186–1193.
 - Dittrich H., & Bieniok A. Structural Properties: X-Ray and Neutron Diffraction. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, Measurement methods*. 2009. pp. 718–737.
 - Zimmermann P., Peredkovd S., Macarena Abdalac P., DeBeerd S., Tromp M., Müller Ch., Jeroen A. van Bokhoven. Modern X-ray spectroscopy: XAS and XES in the laboratory, *Coordination Chemistry Reviews* 423. 2020, pp. 213466.
 - Lachance G.R., Claisse F. *Quantitative X-ray Fluorescence Analysis: Theory and Application*, Gerald R. Fernand Claisse. Wiley Chichester; New York, 1995. 402 p.
 - Zimmermann P., Peredkovd S., Macarena Abdalac P., DeBeerd S., Tromp M., Müller C., J. A. van Bokhovenae. Modern X-ray spectroscopy: XAS and XES in the laboratory. *Coordination Chemistry Reviews*. 2020, vol. 423, pp. 2–28.
 - Van Bokhoven J. A., Lamberti C. *X-ray absorption and X-ray emission spectroscopy: theory and applications*. John Wiley & Sons Ltd, 2016. 845 p.
 - Michael Hollas J. *Modern Spectroscopy, Fourth Edition*. John Wiley & Sons Ltd, 2004, 452 p.
 - Mihajlov I.F., Baturin A.A., Mihajlov A.I. *Rentgenovskie metody analiza sostava materialov: monografija*. Kharkiv.: «Pidruchnik NTU «KhPI»», 2015. 204 p.
 - Ellis A.T. *Energy-dispersive x-ray fluorescence analysis using x-ray tube excitation. Handbook of x-ray spectrometry*. Second Edition, revised and expanded. 2001. ch.3.
 - Waseda Y., Matsubara E., Shinoda K. *X-Ray Diffraction. Crystallography Introduction, Examples and Solved Problems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 322 p.
 - Winholtz R. A., Rogante M. Residual Stresses: Macro- and Microstresses. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. 2001, pp. 8148-8151.
 - Bolognesi Donato G. H., Magnabosco R. Modeling and Characterization of Residual Stresses in Material Processing. *Comprehensive Materials Processing*. 2014, vol. 2, pp. 219–233.
 - Guinebrière R. *X-Ray Diffraction by Polycrystalline Materials*. Wiley-ISTE, 2007, pp 384
 - Gorelik S. S., Skakov Yu. A., Rastorguev L. N. *Rentgenograficheskij i e'lektronno-opticheskij analiz. 3-e izd. dop. i pererab.* М.: MISIS, 1994. 328 p.
 - Website: <http://www.icdd.com>
 - Website: <https://www.crystalimpact.com/match/>

References (transliterated)

- Kurushin A. A. *Reshenie mul'tifizicheskikh SVCh zadach s pomosh'yu*

Надійшло (received) 20.09.2021

Відомості про авторів /Сведения об авторах /About the Authors

Князева (Постельник) Ганна Олександрівна (Князева (Постельник) Анна Александровна, Kniazieva (Postelnik) Hanna) – PhD, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Матеріалознавство», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5290-7566>; e-mail: annapostelnik@ukr.net

Князев Сергій Анатолійович (Князев Сергей Анатольевич, Serhii Kniaziev) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», майстер виробничого навчання кафедри «Матеріалознавство», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6422-3658>; e-mail: obmeninfo@ukr.net

Ткачук Микола Миколайович (Ткачук Николай Николаевич, Tkachuk Mykola) – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології та системи колісних і гусеничних машин ім. О. О. Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>; e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org

Пінчук Наталія Володимирівна (Пинчук Наталья Владимировна, Pinchuk Natalia) – кандидат фізико-математичних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри «Матеріалознавство», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0954-2266>; e-mail: spiritnata@gmail.com