

## ВІДГУК

офіційного опонента – доктора фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника, професора кафедри фізики і хімії твердого тіла Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника Горічка Ігоря Володимировича на дисертаційну роботу Ташука Романа Юрійовича на тему: “**Деформація анізотропних кристалів з різко нелінійними механічними властивостями в умовах обмеженої релаксації напружень**”, яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

### **Актуальність теми дисертаційного дослідження**

Актуальність дослідження ауксетичних матеріалів визначається надзвичайно широким спектром їх можливого застосування у різноманітних галузях промисловості. Особливо цінним на даний час може бути використання у військовій сфері для створення матеріалів та конструкцій з, зокрема, ударно-поглинаючими, властивостями. Для значної кількості матеріалів, які володіють ауксетичними властивостями, дослідження мають епізодичний характер, що можна пояснити складністю задачі визначення ауксетичних властивостей у різних кристалографічних напрямках та представлення їх повного розподілу в тривимірному просторі. Особливо це стосується анізотропних кристалів низької категорії. Окрім отримання нових експериментальних даних, актуальною задачею на сьогодні є інтерпретація отриманих результатів в рамках моделей, встановлення взаємозв'язку спостережуваних ауксетичних властивостей з іншими механічними чи структурними параметрами. Зокрема, важливими є дослідження дефектної підсистеми таких матеріалів, властивостей дислокацій та їх взаємодія з точковими дефектами, які є факторами, що суттєво впливають на механічні властивості кристалів. Таким чином, мета дисертаційного дослідження, яка полягає у встановленні закономірностей формування ауксетичних властивостей у анізотропних кристалах з різним типом хімічного зв'язку і кристалічної будови у широкому інтервалі температур, напрямків у кристалі та концентрацій (для сплавів) з метою виявлення можливих механізмів їх пружної та пластичної аномальної деформації, є актуальною, а її результати становлять практичну цінність.

До найбільш істотних наукових результатів, одержаних у дисертаційному дослідженні, слід віднести наступні:

1. Вперше виявлені та досліджені ауксетичні властивості високо баричних

- надтвердих метастабільних монокристалів діоксиду кремнію – коеситу (моноклінна сингонія) та стишовіту (тетрагональна сингонія);
2. Вперше побудовані характеристичні поверхні модулів Юнга, кутові розподіли коефіцієнтів Пуассона, вказівні поверхні ауксетичності, з яких визначені екстремальні значення  $\mu_{min}$  і  $\mu_{max}$  та ступені ауксетичності для сплавів інтерметалідів *Ag-Au*, *Cu-Ni*, *Cu-Au*, *Cu-Zn* та *Cu-Mn*;
  3. Вперше для сплавів *Cu-Ni* та *Cu-Mn* виявлено аномалії концентраційних залежностей усіх ауксетичних параметрів  $\mu_{min}(X)$ ,  $\mu_{max}(X)$  та  $S_a(X)$  поблизу точок фазового переходу першого (термопружне мартенситне перетворення) і другого (ферромагнетик–парамагнетик) роду, відповідно;
  4. Вперше запропонований механізм релаксації механічних напружень у часткових (змішаних) ауксетичних кристалах  $\alpha$ -кварцу,  $\alpha$ -кристобаліту, *Cu-Mn* та в 2D-шарах індію в умовах обмеженої рухливості дислокацій (дислокаційних перегинів) вузькими ( $10^{-6}$  -  $10^{-8}$  м) каналами підвищеної пластичності поблизу ядра дислокацій, які залягають у ауксетичних напрямках у кристалах, або виникають у напрямках, де  $\mu \geq 0,5$ .
  5. Встановлені взаємозв'язки між симетрією кристалів, анізотропією пружних модулів та структурою лінійних і точкових дефектів створюють підґрунтя для розробки в подальшому теоретичної моделі опису ауксетичних властивостей кристалічних матеріалів.

**Обґрунтування і достовірність** наукових висновків дисертаційної роботи Тащука Р.Ю. визначається використанням для експериментальних досліджень стандартизованих багатократно апробованих методик, а також обґрунтованих моделей та методів для їх інтерпретації.

#### **Практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи**

Отримані в роботі результати моделювання поверхонь кутового розподілу коефіцієнтів Пуассона, вказівних поверхонь ауксетичності та ступеню ауксетичності для анізотропних кристалів дозволяють прогнозувати поведінку цих матеріалів, при їх використанні на практиці, зокрема, у конструкціях з високими ударно-енергетичними та сейсмічно стійкими характеристиками.

Розроблені підходи для дослідження зміни характеру деформації тонких мікро-наношарів у залежності від температури і напрямків у кристалах при жорсткому термоциклованні в умовах відкритого космосу можуть бути використані для вирішення проблеми надійності індієвих мікроконтактів, особливо 2D-наноконтактів, які використовуються у датчиках гравітаційних хвиль.

Отримані в дисертаційній роботі результати можуть бути використані для доповнення спецкурсів з фізики і хімії твердого тіла, фізичного матеріалознавства та суміжних з ними розділів фізики, при підготовці навчальних посібників та підручників.

**Повнота викладення наукових положень та висновків в опублікованих працях.** Основні результати дисертації у повному обсязі опубліковані в провідних фахових наукових журналах, а саме в 5 статтях, 4 з яких внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science. Матеріали дисертаційної роботи доповідались на 11 міжнародних та всеукраїнських конференціях. Обсяг друківаних робіт та їх кількість відповідають вимогам Міністерства освіти і науки України щодо публікації основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

#### **Відсутність порушення академічної доброчесності**

Дисертаційне дослідження є самостійною науковою працею автора, всі описані в дисертації результати є новими і належать безпосередньо автору, а результати інших авторів наведені з відповідними посиланнями. Вважаю, що робота відповідає вимогам академічної доброчесності.

До змісту та оформлення дисертаційної роботи Тацука Р.Ю. є наступні **пропозиції та зауваження:**

1. Серед завдань, поставлених перед автором було створити комп'ютерні програми, які дозволять розрахувати і візуалізувати характеристичні поверхні модулів Юнга, кутові розподіли коефіцієнтів Пуассона та вказівні поверхні ауксетичності для монокристалів довільної сингонії. З чим автор очевидно успішно справився, про що свідчить його дисертаційна робота. Однак в роботі не приводиться навіть коротка характеристика цього програмного пакету.
2. У таблиці 2.2 (ст..81) наводяться дані, щодо зміни концентрації точкових дефектів заміщення в дислокаційній атмосфері Коттрелла у кристалах діоксиду кремнію. Проте з тексту не зрозуміло про які саме дефекти заміщення говориться.
3. На ст..144 наведене твердження: «Унікальне поєднання магнітних і ауксетичних властивостей, а також ефекту пам'яті форми у сплавах  $\text{Cu-Mn}$  при  $X \geq 72\text{ат.}\% \text{ Mn}$  призводить до зростання відношення  $\frac{\bar{\mu}_{\mu>0}}{\bar{\mu}_{\mu<0}}$  в 5-6 разів, і аномально високих, як для кристалів, значень максимальних і

мінімальних коефіцієнтів Пуассона ... ». Попри те, що взаємозв'язок між вказаними автором величинами дійсно є, варто обґрунтувати логіку встановлення «причини» і «наслідку».

4. Автор кілька разів використовує формулу, наведену зокрема у розділі 1 (ф-ла 1.29), для розрахунку розподілу точкових дефектів навколо дислокацій. Проте, автором не вказується конкретні числові значення параметра  $\Omega_0$  при яких проводився розрахунок. Також при виведенні формули, зокрема у цитованій в дисертації роботі Косевича А.М., використовувалось припущення про ізотропність простору в околі дефектів. Варто було б обговорити вплив таких припущень на результат, оскільки досліджувані вами матеріали є сильно анізотропними.
5. На рисунку 5.10 представлено векторні поля зміщення атомів поблизу крайової дислокації у індії при різних значеннях коефіцієнтів Пуассона, які суттєво відрізняються від багатьох інших розрахунків для такого ж типу дислокацій в інших досліджуваних матеріалах. Варто було б спробувати обґрунтувати причини таких суттєвих відмінностей.
6. На ст.77 на рис. 2.17 (і 2.18) відсутні одиниці вимірювання вздовж осей. Також варто було б вказати, можливо хоча б у підписі, орієнтацію екстра площини, що спростить аналіз результатів розрахунку векторів зміщень. Можливо, варто було б вказувати і розмірності на осях рисунків де автором наводяться характеристичні поверхні модуля Юнга, КРКП та ВПА для різних матеріалів.
7. У роботі зустрічаються невдалі формулювання та терміни. Зокрема, «пакет комп'ютерних програм для монокристалів» (певно коректніше було б «пакет програм для розрахунку властивостей монокристалів»), «... властивості  $\alpha$ -кристобаліту у цьому напрямку повністю ізотропні, тому ...» (наскільки коректно говорити про ізотропність у певному напрямку?), кристалічна решітка (кристалічна ґратка), безперервні функції (неперервні функції), гармонійне наближення (гармонічне наближення), щільність матеріалу (густина матеріалу) та ін..

Проте, зроблені зауваження не впливають на загальний високий науковий рівень дисертації, не піддають сумніву основні наукові результати отримані автором та їх практичне значення.

Вважаю, що дисертаційна робота Тащука Романа Юрійовича є завершеним в межах поставлених завдань науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані результати. За актуальністю, обсягом досліджень, науковим рівнем і практичною цінністю отриманих результатів дисертація «Деформація анізотропних кристалів з різко нелінійними

механічними властивостями в умовах обмеженої релаксації напружень» відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022р. №44 (із змінами, внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України №431 від 21.03.2022 р.), а її автор Тацук Роман Юрійович заслуговує на здобуття ступеня доктора філософії у галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент –  
доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
професор кафедри фізики і хімії  
твердого тіла Прикарпатського  
національного університету  
імені Василя Стефаника

Ігор Горічок

