

## ВІДГУК

офіційного опонента **Лоскутова Степана Васильовича**, доктора фізико-математичних наук, професора кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка» на дисертаційну роботу Рибак Надії Іванівни «**Вплив типу деформації на анізотропію фізико-механічних властивостей деяких сплавів на основі магнію, титану та нікелю**», подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

**1. Актуальність теми дослідження.** Дисертаційна робота Надії Іванівни Рибак присвячена дослідженню впливу на текстуру та анізотропію фізико-механічних властивостей різних типів деформації полікристалів з гексагональною структурою.

В умовах отримання та обробки у полікристалічних металевих матеріалах утворюється текстура, яка є причиною виникнення анізотропії фізико-механічних властивостей. Тому, важливою задачею є побудова теоретичних моделей, які адекватно описують анізотропію фізико-механічних властивостей полікристалічного матеріалу, виходячи з відповідних даних його монокристалу та характеристик текстури. При цьому виникає проблема вибору оптимальних характеристик текстури.

Відмітною рисою дисертації Н.І. Рибак є те, що для розрахунку фізико-механічних властивостей гексагональних металів вона реалізувала підхід, оснований на використанні текстурних параметрів Кернса (ПТК). Ці ПТК показують ступень збігу гексагональної осі кристалічної комірки зерен із заданим геометричним напрямком в полікристалічному зразку. Оскільки властивості гексагонального монокристалу розрізняються тільки вздовж гексагональної осі та поперек неї і не залежать від обертання навколо гексагональної осі, то знання параметрів текстури Кернса дозволяють розрахувати властивості ортотропного полікристалу вздовж його трьох головних напрямків. Ці параметри текстури Н. І Рибак у своїй дисертації розраховувала з ОПФ головних напрямків листів.

Використання зазначеного підходу дозволяє також вирішити зворотне завдання з визначення властивості гексагонального монокристалу вздовж гексагональної осі та перпендикулярно неї за експериментальними даними відповідних властивостей полікристала, що є актуальним, оскільки отримання монокристалів достатнього розміру для експериментального виміру не завжди можливо.

Дисертаційна робота Н.І Рибак спрямована на розвиток наукових основ формування текстури і відповідних фізико-механічних властивостей металів.

Актуальні дослідження анізотропії механічних властивостей зразків сплаву Inconel 718, отриманих з порошків за методом селективного лазерного спікання за допомогою 3D друку у горизонтальному та вертикальному напрямках побудови та пост-друкарської об-

робки у різних комбінаціях, оскільки ця нова технологія все ширше використовується для виготовлення виробів складної геометрії.

## **2. Ступень обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

У процесі ґрунтовного і детального аналізу дисертаційної роботи з'ясовано, що дослідження окресленої проблеми є цілісним, системним і повним, оскільки автором роботи науково обґрунтовано теоретичні й методичні основи визначення характеристик структури, текстури і механічних властивостей металів, що досліджувалися. Науковий апарат роботи сформульовано чітко й грамотно. Мета дослідження полягає в оцінюванні фізико-механічних властивостей полікристалічних сплавів з гексагональною структурою за параметрами текстури Кернса та властивостями відповідних монокристалів, визначення властивостей монокристалів досліджуваних сплавів, за даними виміру відповідних властивостей полікристалічних зразків та параметрами текстури Кернса, що реалізується через виконання десяти завдань.

Дисертація складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків до кожного розділу, загальних висновків, списку використаних джерел (разом 134 найменувань, з них 109 іноземними мовами). Основний текст дисертації складає 90 сторінок, загальний обсяг роботи – 143 сторінок, включає 25 рисунків і 25 таблиць..

У розділі 1 «ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ, ТЕКСТУРА ТА АНІЗОТРОПІЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІКРИСТАЛІВ» наведено теоретичне обґрунтування експериментальної методики визначення параметрів текстури і вплив текстури на фізико-механічні властивості полікристалів.

У першому розділі представлено огляд літератури з текстури та методах її визначення та опису, оцінці впливу текстури на анізотропію властивостей полікристалів за інтегральними характеристиками текстури.

Розділ 2 дисертації «МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ» відображає вибір матеріалів для дослідження й обґрунтування методів дослідження.

Позитивним надбанням дисертаційного дослідження вважаємо запропонований дисертанткою метод використання параметрів текстури Кернса для визначення впливу текстури на фізико-механічні властивості гексагональних полікристалів.

У другому розділі описано матеріали, їх підготовка до досліджень та методів дослідження. Матеріалами для дослідження послужили гексагональні сплави на основі магнію (ZE10 – сплав магнію з цинком, цирконієм та рідкоземельними металами, Mg-5 % Li wt., титан марки СТ Grade 1, BT1-0). Досліджували гексагональні сплави після вальцювання та знакозмінного вигину. Сплав титану BT1-0 вивчали після деформування гвинтовою ек-

струзією та подальшого відпалу в інтервалі температур 200 – 400 °С через кожні 50 °С. Жароміцний сплав з ГЦК граткою на основі нікелю Inconel 718 був отриманий за технологією селективного лазерного спікання за допомогою 3D друку в горизонтальному та вертикальному напрямках побудови та пост-друкарської обробці у різних комбінаціях. Наведено динамічний метод виміру модуля Юнга, методи визначення механічних властивостей на розтяг, дослідження текстури рентгенівським методом з побудовою обернених полюсних фігур.

Докладно описано визначення параметрів текстури Кернса з ОПФ для сплавів з гексагональною кристалічною граткою.

Розділ 3 «ВПЛИВ ВИДУ ДЕФОРМАЦІЇ НА ТЕКСТУРУ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ СПЛАВІВ МАГНІЮ» засвідчує успішність виконання першого і другого завдань дослідження.

Третій розділ присвячений опису результатів дослідження впливу виду деформації на текстуру, пружні, механічні властивості та пошкоджуваність сплавів магнію ZE10 та Mg-5 % Li (мас.) за параметрами текстури Кернса та вирішенню оберненої задачі з визначення констант пружності монокристалу сплаву Mg 5 % Li (мас.) за параметрами текстури Кернса та експериментальними значеннями модуля пружності полікристалічних листів сплаву у напрямку вальцювання та поперечному напрямку після вищезазначених видів обробки.

Зроблено оцінки модуля пружності в трьох основних напрямках вихідного листа, а також листів після 0,5; 1,0; 3,0; і 5,0 циклів знакозмінного вигину сплаву магнію марки ZE10 з цинком, цирконієм та рідкоземельними металами. Оцінювання проведено з використанням параметрів текстури Кернса та пружних констант монокристалу сплаву. Встановлено, що максимальне відхилення розрахункових і експериментальних значень не перевищувало 5,2 %. Варто відмітити, що знайдені зміни властивостей та їх анізотропія обумовлено текстурою під дією виду деформації, що підтверджено проведеними кореляційним та регресійним аналізом з високим ступенем достовірності апроксимації рівнянь регресії.

При дослідженні текстури листів сплаву Mg-5 % Li (мас.) були знайдені параметри текстури Кернса. За допомогою знайдених параметрів текстури Кернса та констант пружності монокристалу сплаву Mg-5 % Li (мас.) проведені оцінки модуля пружності після екструзії, подальшого вальцювання та після наступної деформації знакозмінним вигином. Показано, що розрахункові та експериментальні значення модуля пружності листів сплаву відрізняються не більше ніж на 10 %.

Вирішено зворотнє завдання. Показано, що розрахункові значення модулів пружності монокристалу сплаву Mg-5 % Li (мас.) відрізняються від літературних даних, не більше ніж на 4,8 та 7,5 % вздовж осей монокристала  $c$  та  $a$ , відповідно.

Цінним у роботі вважаємо те, що достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується обґрунтованістю головних положень роботи, обранням адекватної експериментальної методики, впровадженням кількісного теоретичного аналізу, використанням методів математичної статистики.

Розділ 4 «ВПЛИВ ВИДУ ДЕФОРМАЦІЇ НА ТЕКСТУРУ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ СПЛАВІВ ТИТАНУ» засвідчує результати здійснення з третього по сьоме завдань дослідження.

У четвертому розділі описаний вплив виду деформації на текстуру, механічні властивості та пошкоджуваність сплавів титану марки ST Grade 1 у вихідному стані (стані поставки) та після знакозмінного вигину, а також досліджено вплив гвинтової екструзії та подальшого відпалу в інтервалі 200-450°C на текстуру, пружні та механічні властивості титану марки VT1-0.

Встановлено, що значення модуля пружності, розраховані на основі констант пружності монокристалу комерційного титану (ST Grade 1) та параметрів текстури Кернса в напрямку вальцювання, поперечному напрямку вихідного листа, а також листів після вищезазначеного різного числа циклів знакозмінного вигину (до 5 циклів), відхилялися від експериментальних значень в межах 5 %.

Знайдено значення меж міцності та плинності монокристалу титану уздовж його гексагональної осі та перпендикулярно їй на підставі емпіричних співвідношень між твердістю і міцністю. Достовірність знайдених значень перевірено шляхом розрахунку значення межі міцності та плинності досліджуваних листів полікристалічного титану, як в початковому стані, так і після відповідної кількості циклів знакозмінного вигину, як у напрямку вальцювання, так і у поперечному напрямку, використовуючи отримані вищезазначені дані для монокристалу та параметри текстури Кернса. Встановлено, що відхилення від відповідних експериментальних значень не перевищували 10 %.

Визначено параметри пошкоджуваності, які характеризують накопичення пошкоджень, зі зміни модуля Юнга після знакозмінного вигину до 5 циклів відносно значень модуля пружності в різних напрямках вихідного листа. Знайдено закономірності зміни параметрів пошкоджуваності листів титану в напрямку вальцювання та поперечному напрямку в процесі знакозмінного вигину.

Далі виконано оцінку модуля пружності сплаву титану VT1-0 в трьох взаємно перпендикулярних напрямках зразків після 5 проходів гвинтової екструзії і відпалу, викорис-

товуючи параметри текстури Кернса і пружні постійні монокристала технічного титану. Показано, що розрахункова величина модуля Юнга вздовж осі екструзії відхиляється від експериментальної в межах 10 %. Слід відмітити, що використання параметрів текстури Кернса дозволило автору дисертації оцінити модуль пружності та механічні властивості сплаву титану VT1-0 після гвинтової екструзії не тільки вздовж осі екструзії, но і поперек неї, що неможливо зробити експериментально внаслідок недостатнього поперечного розміру зразків після екструзії.

Встановлено, що розрахункові значення межі міцності та текучості вздовж осі гвинтової екструзії після 5 проходів ГЕ усього на 1,5 та 1,7 %, відповідно, відхиляються від їх експериментальних величин, отриманих при випробуваннях на одновісний розтяг.

Розділ 5 «ТЕКСТУРА ТА АНІЗОТРОПІЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИРОБІВ ЗІ СПЛАВУ INCONEL 718, ОТРИМАНИХ 3D-ДРУКОМ З ПОРОШКІВ» засвідчує результати здійснення з восьмого по десяте завдань дослідження.

П'ятий розділ присвячений дослідженню впливу 3D друку за технологією селективного лазерного спікання з порошків в горизонтальному та вертикальному напрямку на механічні властивості зразків зі сплаву Inconel 718 з ГЦК структурою. Дана технологія все ширше використовується для виготовлення відповідальних деталей складного профілю, застосованих у аерокосмічній та ядерній галузях промисловості. Але існуючі в літературі дані про вплив технологічних параметрів на фізико-механічні властивості зразків, отриманих за такою технологією, є суперечливими. Тому слід зазначити, що результати, представлені в п'ятому розділі дисертації, що представлена на захист, додають актуальності дисертаційної роботи.

Визначено текстуру зразків надрукованих у горизонтальному та вертикальному напрямків побудови за допомогою дифракції рентгенівських промінів та обернених полюсних фігур. Показано, що відмінність механічних властивостей зразків надрукованих у горизонтальному та вертикальному напрямках, обумовлена кристалографічною текстурою, оскільки мають місце значущі лінійні кореляції між параметрами текстури, представлені сумарною полюсною густиною на обернених полюсних фігурах вздовж сторони  $\langle 001 \rangle$  –  $\langle 111 \rangle$  стереографічного трикутника, з одного боку, та межами міцності, плинності та відносним подовженням з високими коефіцієнтами кореляції.

**3. Наукова новизна** дисертаційної роботи полягає у наступному:

1. Уперше визначено параметри текстури Кернса напрямку нормалі (НН) та напрямку вальцювання (НВ), відповідно, ( $f_{НН}$ ) та ( $f_{НВ}$ ) за даними рентгенівських експериментальних досліджень кристалографічної текстури листів магнієвих сплавів марки ZE10,

Mg – 5 % Li (мас.), титану марки 1 (Ti Grade 1) після заводської поставки та подальшого знакозмінного вигину.

2. Уперше визначено параметри текстури Кернса за даними рентгенівських експериментальних досліджень кристалографічної текстури титану марки VT1-0 після гвинтової екструзії (ГЕ), а також після відпалу при 200, 250, 300, 350 та 400 °С як вздовж напрямку екструзії (НЄ), так і у поперечному напрямку (ПН).

3. Уперше розроблено способи оцінки фізико-механічних властивостей полікристалів з гексагональною структурою за параметрами текстури Кернса та відповідними властивостями монокристалів. Показано, що кількісні оцінки пружних і механічних властивостей відхиляються від відповідних експериментальних значень в межах 10 %.

4. Уперше вирішено зворотню задачу з оцінки констант пружності монокристалів гексагональної симетрії за параметрами текстури Кернса та експериментальними значеннями модуля пружності відповідних полікристалів.

5. За допомогою кількісного кореляційно-регресійного аналізу знайдено фізико-математичні моделі опису зміни фізико-механічних властивостей та їх анізотропії, в залежності від виду та ступеня деформації.

6. Уперше проведено порівняльний аналіз зв'язку параметрів текстури та механічних характеристик зразків сплаву Inconel 718, отриманих селективним лазерним спіканням за допомогою 3D печаті в горизонтальному та вертикальному напрямках побудови та після пост печатної обробки й показано, що основним чинником наявній анізотропії механічних властивостей зазначеного сплаву є кристалографічна текстура, що підтверджено результатами кореляційно-регресійного аналізу.

#### **4. Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих публікаціях, зарахованих за темою дисертації.**

Основні результати дисертації представлені у друкованих 11 наукових джерелах. А саме, 7 статей надруковано в наукових міжнародних журналах. З них 6 статей опубліковано у журналах проіндексованих у науко-метричних базах Scopus та Web of Science. Результати доповідалися на наукових семінарах, конференціях і надруковано у відповідних тезах доповідей.

#### **5. Практична значення роботи полягає в тому, що**

1. Результати з визначення характеристик монокристалів за даними виміру відповідних властивостей у полікристалі Mg-5 % Li можуть бути застосовані для визначення характеристик монокристалів гексагональних матеріалів за відповідними експериментальними даними полікристалів, оскільки отримання монокристалів, достатніх для виміру відповідних властивостей, часто є складною проблемою.

2. Знайдені закономірності формування текстури та змін параметрів пошкоджуваності титанових листів після їх випрямлення за допомогою знакозмінного вигину можуть бути застосовані для корегування технології отримання титанового листового прокату з оптимальними текстурно - структурними характеристиками.

3. Результати досліджень сплаву магнію марки ZE10 можуть бути використані для розроблення технології отримання тонких листів сплавів магнію з цинком, цирконієм і додатками рідкісноземельних металів з поліпшеними характеристиками формозміни та мінімальною анізотропією механічних характеристик.

4. Запропоновані в дисертації методи оцінювання фізико-механічних властивостей гексагональних полікристалічних матеріалів за даними текстурних параметрів Кернса та відповідними характеристиками монокристалів будуть в нагоді, якщо експериментальне визначення властивості за даним напрямком полікристала не дозволяють недостатні розміри зразка в цьому напрямку (наприклад, у нормальному напрямку до надмірно тонкого листа або перпендикулярно осі надмірно тонкого дроту, чи в напрямку зразка перпендикулярно осі гвинтової екструзії).

5. Закономірності утворення текстури у зразках, деформованих гвинтовою екструзією, будуть у нагоді для розробки технологічних режимів отримання металевих виробів із покращеними показниками міцності та пластичності.

6. Враховуючи, що сплав VT1-0 рідко застосовується як конструкційний матеріал, практичною перспективою подальших досліджень є оцінка формування текстури та властивостей титанових сплавів авіаційно-космічного призначення. Серед основних з них можна виділити широко застосовувані для виготовлення лопаток компресора газотурбінних двигунів двофазні та псевдо-двофазні титанові сплави VT3-1, VT6, VT8, VT25 та інші.

7. Результати дослідження текстури та властивостей сплаву Inconel 718 можуть бути використані при отриманні деталей методом селективного лазерного плавлення у відповідних напрямках 3D-друку з оптимальним комплексом властивостей.

## **6. Зауваження та дискусійні положення до дисертації.**

У цілому слід визначити високий науковий рівень здобувачки, обґрунтованість результатів і вказати на певні положення, які мають дискусійний характер.

Позитивно оцінюючи в цілому досягнуті в дисертації Н.І. Рибак теоретичні та практичні результати дослідження вважаю за необхідне висловити певні недоліки та побажання:

1. Значна частина тексту дисертації присвячена опису методу визначення текстури металів, необхідності врахування впливу текстури на механічні властивості деталей. Ба-

жано навести конкретний приклад виходу з робочого режиму деталі під впливом текстури.

2. При формуванні дефектної структури, особливо в титанових сплавах, виникають залишкові напруги і відповідні пружні деформації. Формування текстури сприяє пружним характеристикам зразка або деталі. Наскільки коректне розраховувати анізотропію механічних властивостей з огляду на лише внесок текстури?

3. У рентгенівській методиці вимірювання залишкових напружень для модуля Юнга необхідна текстурна поправка! Виникнення мікротріщин, мікропорожнин призводить до створення мікродеформацій (залишкові напруження другого роду) та відповідних пружних напружень.

4. Формування текстури на поверхні зразків або деталей призводить до створення певної поверхневої енергії. Роль поверхні металевих деталей особливо важлива при багаточислових деформаціях, в процесах контактних деформацій - тертя і зносу. У дисертації аналізується лише один прояв текстурування – анізотропія пружних характеристик – модуль Юнга. Створення певної текстури може вплинути на довговічність і знос металевих деталей.

5. На стор. 79 стверджується «Зі збільшенням кількості циклів ЗВ анізотропія параметру пошкоджуваності зменшується. ... Це може свідчити про те, що пошкодження розміщуються за об'ємом зразків рівномірно та мають кулеподібну форму, тобто пошкодження є, скоріше, мікропорожнечі, а не мікротріщини». Чи можна в даних умовах експерименту пояснити виникнення мікропорожнеч, мікротріщин?

6. Слід було б пояснити, чому для визначення текстурних параметрів Кернса були використані обернені полюсні фігури (ОПФ), а не прямі полюсні фігури (ППФ) площини (0001). ППФ мають більшу кількість експериментальних значень полюсної густини ніж ОПФ. Тому використання ППФ у розрахунках могло б підвищити точність.

7. Було б цікаво пояснити, чи є правомірним вирішення оберненої задачі з визначення властивостей межі міцності та плинності монокристала з експериментальних даних полікристала, оскільки не відомо, чи є ці властивості тензорними величинами?

8. Було б цікаво з'ясувати, чому зменшується анізотропія параметра пошкоджуваності зі збільшенням кількості циклів знакозмінного вигину.


Проте зауваження, що висловлені вище, мають дискусійний характер, що не зменшує наукову новизну, теоретичну та практичну значущість дисертаційної роботи. З аналізу тексту дисертації офіційним опонентом вбачається дотримання здобувачем академічної доброчесності в повному обсязі.

## 7. Загальна оцінка дисертації.

Дисертаційна робота на тему «Вплив типу деформації на анізотропію фізико-механічних властивостей деяких сплавів на основі магнію, титану та нікелю» є цільним завершеним самостійним науковим дослідженням, що виконане на належному теоретичному та експериментальному рівні. Структура та обсяг дисертації відповідає встановленим вимогам. Зміст дисертації відповідає поставленій меті та завданням, які повністю вирішено в процесі дослідження. Основні положення роботи, винесені на захист, мають наукову новизну та практичну цінність. Авторка виявила високий рівень аналізу літератури з проблем дослідження. У тексті не виявлено ознак плагіату, самоплагіату, фальсифікації.

Дисертаційна робота Н. І. Рибак відповідає чинним вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії», затверджену Постановою Кабінету Міністрів України від 14 січня 2022 року № 44, а її автор Н. І. Рибак заслуговує на присудження ступеня доктора філософії зі спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент –  
професор кафедри фізики  
Національного університету  
«Запорізька політехніка»  
доктор фізико-математичних наук, професор



С. В. Лоскутов

Підпис С.В. Лоскутова засвідчую  
Учений секретар  
Національного університету  
«Запорізька політехніка»  
кандидат соціологічних наук, доцент



В. В. Кузьмін