

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Савчук Олени Сергіївни «Вплив деформації на структурні перетворення, механічні властивості та процеси руйнування сплавів заліза та титану»**, представлену до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Розуміння фізичної природи зміни фізико-механічних властивостей металевих матеріалів в процесі їх обробки тиском, з'ясування причин виникнення анізотропії властивостей та її змін під впливом різних факторів, таких як кристалографічна текстура, характеристики структури, її фрактальності, різного роду пошкодження тощо є важливою проблемою фізики міцності та пластичності. Це потребує, в свою чергу, виконання певної низки складних завдань, що можливо лише при комплексному дослідженні впливу різних видів пластичної деформації полікристалічних металевих матеріалів на фізико-механічні властивості, їх зв'язок з вищезазначеними структурно-текстурними характеристиками, дефектністю структури тощо. Вирішення вказаної проблеми ускладнюється недостатнім фізичним обґрунтування відповідних моделей вищезазначених зв'язків на даному етапі розвитку наукових уявлень. Тому встановлення фізико-математичних моделей взаємозв'язку фізико-математичних властивостей та їх анізотропії з текстурно-структурними перетвореннями в результаті тих чи інших видів деформації конкретних металів і сплавів в даний час можливо лише у вигляді отримання надійних кореляцій та відповідних рівнянь регресії.

Дисертаційна робота О. С. Савчук присвячена пошуку та знаходженню таких фізико-математичних зв'язків впливу різних видів пластичної деформації на текстуру, механічні властивості, параметр пошкоджуваності, фрактальність структури та характер руйнування типових конструкційних сплавів заліза з вуглецем та титану. Тому актуальність даної дисертаційної роботи не викликає сумнівів.

В дисертаційній роботі О.С. Савчук досліджено вплив на структурні перетворення, анізотропію механічних властивостей та процеси руйнування сплавів заліза та титану як інтенсивної пластичної деформації гвинтовою екструзією, яка дозволяє отримати ультрадрібнозернисту структуру металу, так і типових видів пластичної деформації, таких як прокатка, одновісний квазістатичний розтяг та динамічний ударний вигин, знакозмінний вигин (що застосовується для випрямлення листового і рулонного металу), довготривала знакозмінна деформація, яка здійснюється в процесі експлуатації арматурних канатів захисних оболонок енергоблоків АЕС.

Охоплення дослідження широкого кола типових конструкційних сплавів, що мають ОЦК, ГЦК та гексагональну ґратки тільки підкреслює актуальність та багатогранність дисертаційного дослідження О. С. Савчук.

Дисертація О.С. Савчук має класичну структуру для кандидатських робіт з фізики твердого тіла. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, кожний з яких

закінчується коротким висновком, основного висновку, списку використаних джерел зі 133 найменувань. Робота викладена на 149 сторінках і включає 53 рисунка і 11 таблиць.

У **вступі** наводиться обґрунтування актуальності та значення проведених досліджень, сформульовані мета та задачі, вказуються об'єкт, предмет та методи досліджень; наведено новизну результатів дисертації їх практичну цінність та особистий внесок автора при їх одержанні.

У **першому** розділі здійснено критичний огляд методів дослідження та опису кристалографічної текстури, як одного з головних структурних станів деформованих металевих полікристалів. Розглянуто рентгенографічний метод дослідження текстури на відображення, а також сучасний метод реєстрації на проходження за допомогою жорсткого синхротронного випромінювання, опис текстури за допомогою прямих та обернених полюсних фігур (ОПФ), трьохвимірної функції розподілу кристалів за орієнтацією (ФРО) по Г. Й. Бунге, а також ФРО, що розраховується з двох ОПФ у просторі ідеальних орієнтації, що є більш наочним.

Проаналізовано опис накопичення пошкоджень у матеріалі в рамках класичної теорії Качанова–Работнова за допомогою параметра пошкоджуваності $0 \leq \omega \leq 1$, який дорівнює нулю у непошкодженому стану матеріалу, та одиниці у зруйнованому стані. Зроблено критичний аналіз розвитку визначення параметра пошкоджуваності за допомогою дослідження відносної зміни модуля пружності після певного ступеню пластичної деформації за формулою

$$\omega = 1 - \sqrt{E/E_0}, \quad (1)$$

де E_0 та E – модулі пружності неушкодженого та ушкодженого матеріалу.

Проведено детальний аналіз зв'язку фрактальної розмірності мікроструктури з характером руйнування. Показано, що у науковій літературі мають місце певні протиріччя щодо зв'язку фрактальної розмірності з фізико-механічними властивостями полікристалічних матеріалів. Тому вивчення фрактальності структури та характеру руйнування, безсумнівно, потребує подальших досліджень.

У **другому розділі** описано матеріали та методи дослідження. Матеріалами для дослідження послуговували сплав заліза з вуглецем 10Г2 після гвинтової екструзії (ГЕ), сплави 08кп, 05Х19Н10 і комерційний титан марки ВТ1-0 у вихідному стані та після подальшої деформації знакозмінним вигином, зразки сплаву Ст20К, котрі вирізані з фрагменту оболонки колони тиску діаметром 2,2 м і товщиною 12 мм після закінчення терміну її планової експлуатації, зразки дротів типових канатів захисних оболонок АЕС зі сплаву марки 85 після експлуатаційного руйнування.

Для дослідження градієнту кристалографічної текстури по перерізу зразка зі сплаву заліза з вуглецем 10Г2 після гвинтової екструзії була використана реєстрація на проходження рентгенівського випромінювання за допомогою синхротрону DESY (Гамбург, Німеччина). Текстуру деформованих інших досліджуваних матеріалів вивчали з використанням

обернених полюсних фігур, отриманих реєстрацією на відображення за допомогою рентгенівського дифрактометра.

Описано визначення фрактальної розмірності поверхонь руйнування після ударних випробувань, а також фрактальних розмірностей діаграм запису зміни зусилля з часом руйнування при ударних випробуваннях по Шарпі методом покриття певної ділянки кривої чи площі руйнування квадратними сітками різного масштабу за допомогою сучасного комп'ютерного засобу HarFA.

Зазначено, що механічні випробування на одновісний розтяг здійснювалось за допомогою жорстких розривних машин типу Instron на зразках, вирізаних у різних напрямках по відношенню до напрямку прокатки для визначення анізотропії механічних характеристик, як після прокатки, так і після певної кількості циклів знакозмінного вигину, який моделювали за допомогою спеціально виготовленого приладу.

Параметри пошкоджуваності ω зразків досліджуваних матеріалів оцінювали з використанням симетричного тензора пошкоджуваності другого порядку ω за формулою (1). При одновісному розтягу лише один компонент цього тензора не рівний нулю. Оцінювали пошкоджуваність, спричинену напруженнями на рівні границь плинності $\sigma_{0,2}$ і міцності σ_B .

У **третьому** розділі наведено розвиток автором дисертації врахування впливу різних видів пластичної деформації на текстуру, мікроструктуру, анізотропію механічних властивостей та параметр пошкоджуваності. Отримано низку нових результатів:

- показано, що при гвинтовій екструзії сплаву 10Г2 має місце градієнт текстури, а саме, перехід від орієнтувань куба $\{001\}\langle 100\rangle$ і кручення типу $\{110\}\langle uvw\rangle$ на периферії до компонентів пресування $\{111\}\langle uvw\rangle$ (γ – волокно) у центрі зразка. При цьому вісь екструзії поступово обертається навколо напрямку $\langle 111\rangle$ від напрямку $\langle 113\rangle$ до напрямку $\langle 110\rangle$ у різних шарах зразка;

- встановлено значущі кореляційні зв'язки між усередненими за напрямками в листах значеннями коефіцієнта пошкоджуваності ω_{cp} після різної кількості циклів знакозмінного вигину і усередненими по обидва боки значеннями листів величин полюсної густини $P_{cp} = (P_{110} + P_{112} + P_{111})_{cp}$ на ОПФ НН сплаву заліза з вуглецем з 08кп ОЦК-граткою;

- встановлено значущі кореляції усереднених за напрямками листів значень межі міцності σ_B , умовної межі плинності $\sigma_{0,2}$, відносного рівномірного подовження $\Delta l/l$ і параметру пошкоджуваності ω при одновісних випробуваннях на розтяг після знакозмінного вигину з величинами полюсної густини P_{110} , усередненими по обидва боки листів сплаву заліза з ГЦК-граткою 05X18H10;

- показано, що спостережувана анізотропія механічних властивостей й параметрів пошкоджуваності титанових листів ВТ1-0 (ГЦУ-гратка) та її зміни обумовлені кристалографічною текстурою після відповідних циклів ЗВ. При збільшенні кількості циклів знакозмінного вигину існують значущі нелінійні (квадратичні) кореляції значень σ_B , $\sigma_{0,2}$, $\Delta l/l$, $\omega_{0,2}$ та ω_B з відповідними величинами усередненої полюсної густини P_{cp} у

напрямку прокатки (НП), діагональному напрямку ДН (тобто $\text{НП} + 45^\circ$) та поперечному напрямку (ПН).

Знайдено відповідні рівняння регресії з високими значеннями коефіцієнтів надійності апроксимації (від 0,66 до 0,99) механічних характеристик та параметра пошкоджуваності на усереднену величину полюсної густини, що перевищує її значення для зразка без текстури.

У четвертому розділі представлено вивчення впливу текстури, структури та її фрактальної розмірності на характер руйнування дротів сталевих канатів захисних оболонок енергоблоків АЕС. Значна частина енергоблоків АЕС України експлуатується понад 30 років. Розриви дротів захисних арматурних канатів трапляються дедалі частіше. Опубліковані результати досліджень оболонок АЕС стосуються, в основному, довговічності їх залізобетонних конструкцій, методології оцінювання експлуатаційної надійності за результатами діагностування їх технічного стану. Для повної експертизи руйнувань арматурних канатів треба врахувати не тільки чинники технології виготовлення та експлуатаційні впливи, але й структурно-текстурний стан речовини, визначений за допомогою фрактографічних досліджень та використати можливості фрактального аналізу поверхонь зламів, що поки що не враховується.

У даній дисертаційній роботі такі комплексні дослідження були проведені і показано, що після експлуатаційного розриву дротів канатів захисних оболонок енергоблоків АЕС зі сплаву заліза з вуглецем марки 85 меншим значенням параметра пошкоджуваності ω та показникам пластичності (відносного подовження δ , звуження ψ) відповідає більша фрактальна розмірність їх зламів, і навпаки. При цьому передчасне руйнування при тривалій експлуатації канатів захисних оболонок АЕС може відбуватися внаслідок зародження та поширення корозійних тріщин за рахунок фретинг-корозії.

Далі, в четвертому розділі проаналізовано зв'язок кристалографічної текстури сплаву заліза з вуглецем з ОЦК-граткою марки Ст20К, фрагмент якої був вирізаний з колони для нафтопереробки після закінчення терміну експлуатації, анізотропією механічних властивостей при квазістатичних випробуваннях на одновісний розтяг, а також зв'язок текстури з ударною в'язкістю по Шарпі і фрактальною розмірністю поверхонь руйнування і фрактальною розмірністю діаграм запису зміни зусилля під час навантаження в процесі випробувань при температурах -50°C , $+20^\circ\text{C}$ і $+50^\circ\text{C}$ на ударний вигин по Шарпі зразків, вирізаних у різних напрямках щодо напрямку прокатки. Отримані нові результати і показано, що:

- анізотропія механічних властивостей досліджуваного сплаву Ст20К у площині прокатки обумовлена, головним чином, кристалографічною текстурою металу, що підтверджується даними кореляційного та регресійного аналізу;
- крихкому руйнуванню при випробуваннях на ударний вигин зразків Шарпі зі сплаву Ст20К відповідають більші значення фрактальної розмірності як діаграм зміни навантаження з часом, так і фрактальної розмірності відповідних зламів, але менша ударна в'язкість, і навпаки;

- спостережувана анізотропія фрактальної розмірності зламів і діаграм зміни навантаження з часом при випробуваннях на ударний вигин, що має місце у площині прокати сплаву Ст20К, обумовлена впливом кристалографічної текстури $\{001\} \langle 110 \rangle$, типової для сплавів з ОЦК гратками.

Разом з тим, стосовно дисертаційної роботи є певні зауваження:

1. Було б доцільно провести кореляцію характеристик текстури зразків з характеристиками міцності та пластичності у тих самих напрямках, в яких їх було визначено при випробуваннях на одновісний розтяг.

2. Варто було б встановити кореляцію між кількістю циклів знакозмінного вигину з мікронапруженнями кристалічної ґратки та розміром областей когерентного розсіювання, що визначались за розширенням рентгенівських дифракційних ліній.

3. Було б доцільно з'ясувати, як залежить параметр пошкоджуваності від мікронапружень кристалічної ґратки, які, в свою чергу, можуть бути пов'язані з щільністю дислокацій після різного виду пластичних деформацій.

4. У розділі 4 автором представлені результати досліджень механічних характеристик захисних канатів АЕС, котрі позначені як АК1 і АК2, у ділянках, що умовно обрано «зліва» і «справа» по відношенню до місця розриву. Звичайно, у зазначених ділянках, як і можна було передбачити, авторами встановлено суттєві відмінності досліджуваних механічних характеристик ($\sigma_B, \sigma_{0.2}, \omega, \delta, \psi$; Табл. 4.2), в порівнянні з такими неушкодженої частини дротів. При цьому, автором зафіксовано суттєве зменшення вмісту кремнію у сплавах АК1 і АК2, та вуглецю у сплаві АК1 (Табл. 4.1) у випадку ділянки «справа» в порівнянні з ділянкою «зліва» та неушкодженої частини дротів загалом. Однак, природа цього явища та причини, що викликають суттєве зменшення вказаних хімічних елементів у випадку ділянки «справа» досліджуваних сплавів, автором не пояснюються.

5. На рисунку 3.4 автором представлені гістограми залежності межі міцності на одновісний розтяг, умовної межі плинності, відносного рівномірного подовження і параметра пошкоджуваності ОЦК-сплаву заліза з вуглецем (типу 08кп) після випробувань на одновісний розтяг, однак меж похибок цих величин автором не наведено. Це також стосується вимірювань модуля Юнга титанових зразків (розділ 3) та механічних характеристик захисних канатів АЕС, що наведені в розділі 4.

6. На стор. 64 автором наведені дані визначення процентного вмісту хімічних елементів у досліджуваних сплавах, але не вказано чи це є атомні проценти, вагові, а чи молярні.

7. Є деякі зауваження щодо оформлення тексту дисертації. Наприклад, замість виразу «ставлення с/а вище 1,732» (стор. 50) варто використовувати «відношення с/а перевищує 1,732», замість «гексагональні матеріали» та «кубічні метали і сплави» (стор 50) варто писати «матеріали з гексагональною структурою» та «метали і сплави з кубічною ґраткою», замість «функція ψ убуває» (стор. 51) вжити «функція ψ зменшується». Слід використовувати термін «напрямок пресування» замість «орієнтовка пресування» (стор. 76), та «при температурах, що нижчі 0 °С» замість «при негативних температурах» (стор. 116). Крім того, замість

терміну «безліч», що зустрічається в багатьох місцях дисертаційної роботи, варто використовувати «множина»,

Зазначені вище зауваження не стосуються основних результатів і висновків та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Вони носять характер порад автору для майбутніх досліджень. Результати роботи можуть бути використані не тільки науковими установами та навчальними закладами, а й промисловими підприємствами, котрі займаються дослідженнями і впровадженнями канатів захисних оболонок АЕС.

Дисертація є комплексною завершеною роботою. Робота гарно оформлена і базується на детальному сумісному аналізі попередніх досліджень інших вчених та результатів автора.

Наукова аргументація висновків дисертації є переконливою та відповідає сучасному рівню експериментальних і розрахункових методів фізики твердого тіла. В дисертації використовується адекватний математичний апарат.

Основні положення дисертації відображені в авторефераті і є ідентичними до її змісту..

Результати дисертації пройшли широку апробацію, доповідались на багатьох конференціях, опубліковані в авторитетних наукових виданнях, мають наукову новизну та практичну цінність і можуть бути використані для більш достовірної оцінки надійної експлуатації досліджених конструкційних матеріалів.

Вважаю, що дисертація Савчук Олени Сергіївни «Вплив деформації на структурні перетворення, механічні властивості та процеси руйнування сплавів заліза та титану» є завершеною науковою роботою, зроблені в ній висновки в достатній мірі аргументовані і підтверджуються теоретичними та експериментальними даними. Виходячи з вищенаведеного, вважаю, що дисертація О.С. Савчук за своїм науковим рівнем, актуальністю виконаних досліджень, об'ємом та практичним значенням отриманих в ній результатів повністю відповідає вимогам МОН України до дисертаційних робіт, що висуваються на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук, п. 10-15 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами згідно з ПКМУ № 656 від 19.08.2015 р.), а її автор, Савчук Олена Сергіївна, заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла .

Офіційний опонент:

завідувач відділу спектроскопії поверхні новітніх матеріалів

Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України,

доктор фізико-математичних наук,

старший науковий співробітник



О.Ю. Хижун

Підпис зав. від., д.ф.-м.н., с.н.с. Хижун О.Ю. засвідчую:

Учений секретар Інституту проблем матеріалознавства

ім. І.М. Францевича НАН України,

кандидат фізико-математичних наук




В.В. Картузов