

офіційного опонента на дисертацію О.С. Савчук «Вплив деформації на структурні перетворення, механічні властивості та процеси руйнування сплавів заліза та титану», представлена на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

Актуальність теми. Як відомо, при пластичної деформації металевих матеріалів відбувається ушкодження структури за рахунок утворення мікропор, мікротріщин та їх скупчень. Зі збільшенні ступеню деформації це призводить до руйнування металевого матеріалу. В залежності від виду деформації, швидкості навантаження відбуваються також структурні перетворення, виникає анізотропія механічних властивостей та її зміни в залежності від сформованого типу текстури на певних стадіях деформації та її виду. Очевидно, що всі вищезазначені явища є взаємопов'язаними. Але фізичні уявлення цих взаємозв'язків для різних видів пластичної деформації остаються не з'ясованими. Зрозуміло, що такі зв'язки не можуть бути універсальними, адже для кожного виду пластичної деформації закономірності, скоріше за все, є різними. Тому їх вивчення має здійснюватися окремо. Більш того, закономірності впливу однакового виду деформації на механічні властивості металевих матеріалів з різним типом кристалічної ґратки є також відмінними. Тому вплив різних видів деформації на структурні перетворення, механічні властивості та процеси руйнування різних матеріалів мають вивчатися окремо. Крім того, фізичні моделі впливу того чи іншого типу деформації на механічні властивості, структурні перетворення та руйнування навіть типових кристалічних структур поки ще не мають достатнього фізичного обґрунтування. Тому дослідження зв'язків виду деформації з механічними властивостями та процесами руйнування для кожного типу структури металу та отримання кількісних фізико-механічних моделей шляхом пошуку надійних кореляцій та рівнянь регресії, що проведено Е.С. Савчук у її дисертаційній роботі, є актуальним.

Відмінною рисою дисертації О.С. Савчук є те, що в неї отримано фізикоматематичні моделі у вигляді надійних кореляційних зв'язків і відповідних рівнянь регресії між характеристиками міцності, пластичності, ударної в'язкості, параметрами пошкоджуваності та характеристиками текстури, фрактальною розмірністю структури та характером руйнування під дією таких актуальних видів пластичної деформації, як гвинтова екструзія (що дозволяє отримати ультра дрібнозернисту дуплексну структуру з м'якою серцевиною та міцною периферією), прокатка для отримання листового металу, знакозмінний вигин (що використовують на практиці для випрямлення чи правки листового і рулонного металу), ударний вигин (для характеристики механічних властивостей при швидкому навантаженні), довготривала циклічна деформація, що здійснюється в процесі реальної експлуатації конструкцій. У дисертаційній роботі О. С. Савчук досліджено широке коло певних типових сплавів заліза з вуглецем, що мають об'ємно центровану кубічну (ОЦК) (10Г2, 08кп, Стк0К, 85) та гранецентровану кубічну (ГЦК) ґратку (05Х18Н10), а також титан комерційної чистоти з гексагональною щільно упакованою (ГЦУ) ґраткою (ВТ1-0). Це свідчить про досить великий обсяг досліджень.

Наукова новизна дисертаційній роботі не визиває сумнівів, оскільки низка результатів отримана вперше:

- градієнт текстури по перерізу зразка зі сплаву 10Г2 після гвинтової екструзії;
- знайдено надійні кількісні кореляції та відповідні рівняння регресії залежності анізотропії параметру пошкоджуваності ω листів, як від кількості циклів знакозмінного вигину, так і від параметрів текстури сплавів заліза з вуглецем 08кп, Х18Н10 та титану ВТ1-0 при одновісних випробуваннях після знакозмінного вигину;

- встановлено, що фретинг-корозія (тобто корозія у корозійному середовищі під час циклічного взаємного переміщення двох поверхонь, що контактують) є ймовірною причиною передчасних руйнувань дротів зі сплаву 85 типових арматурних канатів захисних оболонок АЕС. Виявлено, що за нижчої пластичності металу дроту і меншої його пошкоджуваності реалізується крихке руйнування, якому відповідає більша фрактальна розмірність;

- проведено зіставлення фрактальних розмірностей зламів D_f і фрактальних розмірностей D_c діаграм $P(\tau)$ зміни зусилля P з часом τ при випробуваннях на ударний вигин (УВ) при $+50^\circ\text{C}$, -50°C і кімнатній температурах зразків Шарпі, вирізаних під різними кутами до напрямку прокатки зі сплаву Ст20К, та текстури;

- встановлено подібність закономірностей зміни відповідних фрактальних розмірностей D_f і D_c і показано, що максимальні значення фрактальних розмірностей діаграм $P(\tau)$ і поверхонь руйнування (зламів) відповідають крихкому руйнуванню та мінімальній ударній в'язкості, а мінімальна фрактальна розмірність відповідає в'язкому характеру руйнування та максимальній ударній в'язкості. Встановлено, що найбільші значення фрактальної розмірності, знайдені для зразків, вирізаних під кутом 45° до НП, є обумовленими впливом орієнтувань $\{001\}\langle 110\rangle$, які є основним компонентом текстури металів і сплавів з ОЦК граткою.

Практична значення роботи.

Знайдені закономірності формування текстури та її неоднорідності після гвинтової екструзії сплаву 10Г2 можуть бути використані для розробки нових технологій, які дозволяють створювати в листах оптимальну структуру, що спроможна збільшити міцність при добрій пластичності.

Знайдені закономірності впливу знакозмінного вигину на текстуру та параметр пошкоджуваності при подальших випробуваннях на одновісний розтяг сплавів 08кп, 05Х18Н10 можуть бути використані для розробки технології поліпшення формозміни сплавів при обробці тиском, що є актуальним у автомобілебудуванні, для поліпшення технології виготовлення листової та рулонної нержавіючої сталі.

Результати дослідження впливу малоциклового знакозмінного вигину (ЗВ) і кристалографічної текстури на анізотропію параметру пошкоджуваності ω листів комерційного титану при подальших одновісних випробуваннях на розтяг можуть бути використані для створення технології отримання сплавів на основі титану з підвищеним терміном експлуатації.

Результати дослідження зв'язку фрактальної розмірності зламів дротів типових арматурних канатів захисних оболонок АЕС з параметрами пошкоджуваності та механічними властивостями можуть бути використані для удосконалення методики дослідження тривалості безпечної експлуатації канатів захисних оболонок АЕС.

Результати зіставлення фрактальних розмірностей зламів D_f та фрактальних розмірностей D_c діаграм зміни зусилля з часом при випробуваннях на ударний вигин зразків зі сплаву Ст20К та зв'язку з текстурою можуть бути використані для удосконалення методики визначення температури крихкості конструкційних матеріалів з урахуванням текстури.

Зв'язок дисертаційних досліджень з науковими програмами. Робота проводилася в рамках НДР з експериментальних і теоретичних досліджень процесів формування текстури і анізотропії фізико-механічних властивостей, які ведуться на кафедрі фізики Державної установи «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського», зокрема, по темі «Мультимасштабне моделювання процесу пластичної деформації текстурованих полікристалів» (Державний реєстраційний № 0114U000002).

Апробація роботи. Результати неодноразово доповідалися на наукових семінарах і опубліковано в тезах 5 міжнародних конференцій. Основні результати дисертації

опубліковано в 5 авторитетних рецензованих наукових періодичних виданнях, два з яких індексовано у базі даних Scopus.

Достовірність отриманих результатів забезпечена проведенням відповідних викладок і доказів, а також порівнянням з результатами інших авторів.

У авторефераті досить вичерпно викладено основні положення дисертаційної роботи.

Зміст роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, що закінчуються короткими висновками, основного висновку, списку літератури, що нараховує 133 джерела, і додатку.

У **вступі**, наведено огляд літератури, результатів, що є на сьогоднішній день, показано певні протиріччя, що мають місце у науковій літературі щодо наявності зв'язку фрактальної розмірності поверхонь руйнування з механічними властивостями, відсутністю даних про вплив знакозмінного вигину та текстури на параметр пошкоджуваності при випробуваннях на одноісний розтяг та ударний вигін.

Здійснено критичний аналіз опису накопичення пошкоджень за допомогою параметра пошкоджуваності ω , який (по класичній теорії Качанова-Работнова) дорівнює 0 для неушкодженого матеріалу і має значення 1 при руйнуванні. Такий підхід дозволяє уявити параметр оцінити параметр пошкоджуваності зі зміни модуля пружності в процесі навантаження, так як інтерпретується як відносне скорочення внаслідок розподілених всередині зразка мікродефектів ефективної, площі поперечного перерізу, що несе навантаження.

У **другому розділі** описано матеріали та методи дослідження. Для дослідження текстури використано рентгенівські методи як на відображення за допомогою дифрактометра при зйомці обернених полюсних фігур (ОПФ), так і метод зйомки на проходження жорсткого рентгенівського синхротронного випромінювання з представленням текстури за допомогою трьохвимірної текстурної функції за Г.-І. Бунге.

Квазістатичні механічні випробування на розтяг виконувались на жорстких розривних машинах. Одноісний розтяг та ударні випробування по Шарпі виконували в різних напрямках щодо напрямку прокатки з метою виявлення анізотропії.

Параметр пошкоджуваності визначався зі зміни модуля пружності за формулою $\omega = 1 - \sqrt{E/E_0}$, де E_0 і E модулі неушкодженого та ушкодженого матеріалу, відповідно.

Виконували мікроструктурні дослідження за допомогою оптичної та електронної мікроскопії з сучасними методами комп'ютерної візуалізації.

Для визначення фрактальної розмірності використовували комп'ютерний фрактальний аналіз за допомогою програмного засобу HarFA.

У **третьому розділі** представлено результати дослідження впливу виду деформації на текстуру, мікроструктуру, механічні властивості та пошкоджуваність сплавів заліза з вуглецем та титану.

Встановлено неоднорідність (градієнт) текстури, а саме показано, що вісь екструзії обертається навколо кристалографічного напрямку $\langle 111 \rangle$, займаючи в різних шарах циліндричного зразка орієнтацію від напрямку $\langle 113 \rangle$ до $\langle 110 \rangle$. У центрі зразка спостерігається текстура куба $\{001\}\langle 100 \rangle$, а на периферії – текстура кручення $\{111\}\langle uvw \rangle$.

Далі представлено результати дослідження впливу знакозмінного вигину (ЗВ) на механічні властивості та параметр пошкоджуваності сплаву 08кп з ОЦК граткою. Показано, що має місце анізотропія параметру пошкоджуваності ω , межі міцності, умовної межі плинності та відносного подовження при одноісних випробуваннях на розтяг після деформації знакозмінним вигином у листах сплаву. Мінімальна анізотропія спостережена після 5 циклів ЗВ. Встановлено значущі кореляційні зв'язки та відповідні лінійні рівняння регресії з коефіцієнтами надійності апроксимації не менш 0,9 між усередненими за напрямками в листах параметром пошкоджуваності ω_{cp} і усередненими

по обидві сторони значеннями листів величин полюсної густини, що перевищують значення для зразка без текстури $P_{cp} = (P_{110} + P_{112} + P_{111})_{cp}$

Далі представлено результати досліджень впливу знакозмінного вигину (ЗВ) на властивості сплаву заліза з вуглецем X18N10. Спостерігається анізотропія параметра пошкоджуваності ω і механічними характеристиками. Величина анізотропії зменшується зі збільшенням кількості циклів знакозмінного вигину та має мінімальне значення після 5 циклів ЗВ. Після різної кількості циклів знакозмінного вигину орієнтації $\langle 110 \rangle$ мають найвищі значення полюсної густини на ОПФ НН, тобто ці напрямки, в основному паралельні напрямку нормалі до площини листа. Тому саме такі напрямки відповідають за анізотропію параметра пошкоджуваності ω , межі міцності, умовної межі плинності та відносного подовження при одновісних випробуваннях на розтяг після деформації знакозмінним вигином у листах сплаву X18N10 з ГЦК ґраткою. Це підтверджено знайденими квадратичними рівняннями регресії з коефіцієнтами надійності апроксимації не менш ніж 0,61.

У листах титану VT1-0 має місце анізотропія механічних властивостей та параметра пошкоджуваності при випробуваннях на одновісний розтяг після попередньої деформації різною кількістю циклів знакозмінного вигину. Анізотропія механічних властивостей та параметра пошкоджуваності, а також їх зміна зі збільшенням числа циклів знакозмінного вигину здійснюється, в основному, за рахунок відповідних змін текстури. При цьому найбільші зміни структури, механічних властивостей, а також параметра пошкоджуваності виникають протягом перших трьох-п'яти циклів знакозмінного вигину, що підтверджується результатами кореляційного та регресійного аналізу у вигляді знайдених відповідних квадратичних рівнянь регресії.

У четвертому розділі представлено вплив текстури структури та її фрактальної розмірності на характер руйнування дротів зі сплаву заліза з вуглецем марки 85 для канатів захисних оболонок енергоблоків АЕС, а також вплив деформації при випробуваннях на одновісний розтяг і ударний вигин зразків сплаву Ст20К в, вирізаних з фрагменту сосуду тиску після закінчення планового терміну експлуатації.

Досліджували два фрагмента дротів $\varnothing \sim 5$ мм з арматурних канатів (умовно АК1 і АК2) довжиною 500 – 550 мм. Термін експлуатації АК1 – 15 років. Термін експлуатації АК2 – 5 років. Встановлено, що після експлуатаційного розриву дротів канатів захисних оболонок АЕС меншим значенням параметра пошкоджуваності ω та показникам пластичності (відносного подовження δ , звуження ψ) відповідає більша фрактальна розмірність їх зламів, і навпаки. Встановлено, що ймовірною причиною розриву канатів є фретінг-корозія.

Далі представлено результати дослідження сплаву Ст20К після випробувань на одновісний розтяг у різних напрямках через кожні 15° від напрямку прокатки до поперечного напрямку. Встановлено анізотропія межі міцності σ_B , плинності $\sigma_{0,2}$ та відносного подовження δ , обумовлена кристалографічною текстурою за даними кореляційного та регресійного аналізу. Знайдено квадратичні рівняння регресії зв'язку полюсної густини ($P_{100} + P_{110}$), які розташовані у площині прокатки, з вищезазначеними механічними властивостями. Відповідні коефіцієнти надійності апроксимації дорівнюють 0,99.

Далі представлено результати порівняння величин фрактальної розмірності поверхонь руйнування зразків сплаву Ст20К після випробувань на ударну в'язкість по Шарпі у напрямку прокатки, під 45° до нього і у поперечному напрямку з величиною фрактальної розмірності діаграм залежності зусилля з часом при випробуваннях. Випробування здійснювали при температурах -50°C , $+20^\circ\text{C}$ і $+50^\circ\text{C}$. Представлено світлини фрактограм зламів. Проаналізовано характер руйнування при вищевказаних температурах випробувань. Встановлено, що крихкому руйнуванню при випробуваннях на ударний вигин зразків Шарпі зі сплаву Ст20К відповідає більша величина фрактальної

розмірності діаграм зміни навантаження з часом, а також відповідних зламів, але менша ударна вязкість і навпаки.

В якості **зауважень і побажань** щодо дисертаційної роботи можна виділити наступне:

1. Як пояснити, що фрактальна розмірність при крихкому руйнуванні більша ніж при в'язкому руйнуванні.

2. Було б доцільно порівняти результати, отримані за змінами модуля пружності після певного ступеня деформації, з результатами прямих спостережень структури за допомогою мікроскопічних досліджень.

3. При аналізі впливу текстури на анізотропію параметра пошкоджуваності та механічних властивостей у площині листів було б більш коректно зіставляти значення полюсної густини не в напрямку нормалі до листа, а в тих самих напрямках, у яких були визначені відповідні властивості.

4. У тексті дисертації іноді зустрічаються помилки у вигляді злітного написання двох слів.

Висновки. Дисертаційна робота О.С. Савчук виконана на високому науковому рівні, містить нові результати, що мають практичну цінність. Дисертація являє собою закінчене дослідження, яке своєю актуальністю, науковою новизною, обсягом, методологією та практичним значенням відповідає вимогам, що пред'являються до кандидатських дисертацій. Вважаю, що автор дисертаційної роботи, Олена Сергіївна Савчук, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла.

Доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри фізики оптичного зв'язку
Одеської національної академії зв'язку
Імені О.С. Попова



І.М. Вікулін

Підпис д. ф.-м. н., професора І.М. Вікуліна
засвідчую



ПІДПИС ЗАВІРЯЮ:
УЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
ОНАЗ ІМ. О.С. ПОПОВА
Руда Г.В.

