

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Фізичний факультет
Кафедра фізики твердого тіла

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри кафедри фізики твердого тіла
проф. Зиман З.З _____
«___» травня 2024 р.

Оцінка «___»
Голова ДЕК

«___» травня 2024 р.

Владислав Грінченко

**Дослідження *in situ* поверхні полікристалічних зразків
алюмінію в процесі пластичного деформування за допомогою
лазера з вертикальним резонатором.**

Дипломна робота на здобуття
освітньо-кваліфікаційного рівня
«Магістр» за спеціальністю
104 – «фізика та астрономія»
освітньо-наукова програма –
«фізика»

Науковий керівник:
кандидат фіз.-мат наук
доц. Шурінов Р.В.

Рецензент :
кандидат фіз.-мат. наук
доц. Лебедєв С.В.

Харків 2024

АНОТАЦІЯ

Владислав Грінченко

Дослідження *in situ* поверхні полікристалічних зразків алюмінію в процесі пластичного деформування за допомогою лазера з вертикальним резонатором – Рукопис.

Дипломна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» за спеціальністю 104 – «фізика та астрономія» освітньо-наукова програма – «фізика» – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, 2024 - 25 с , – 12 рис.

У роботі для дослідження використовувались полікристалічні зразки алюмінію, отримані з алюмінієвої фольги, що пройшла холодну прокатку. Зразки були підготовлені шляхом відпалу для зняття внутрішніх напружень, а потім деформовані до ступеня $\varepsilon = 2,5\%$ для зміни середнього розміру зерен, що сприяло подальшій рекристалізації при відпалі. Поверхня зразків була оброблена за допомогою хімічного травлення і електрохімічного полірування для покращення візуальної оцінки зеренної структури.

Експериментальна установка забезпечувала точне вимірювання деформаційних кривих, орієнтаційних та структурних змін зразків за допомогою високошвидкісних вимірів і записів. Використовувані механічні випробування включали активне розтягування з постійною швидкістю деформації. Жорсткість рами деформаційного обладнання відповідала стандартам великих тестових машин, забезпечуючи надійність і точність отриманих даних.

Особлива увага приділялася взаємодії лазерного випромінювання з полікристалічними зразками, що дозволило аналізувати кристалографічну орієнтацію і структуру зерен. Експерименти показали, що властивості квазіперіодичних структур залежать від орієнтації зерен, що виявлялося у специфічних дифракційних картинах.

Це дослідження сприяє розумінню впливу механічних і термічних обробок на структуру та властивості полікристалічних матеріалів, відкриваючи нові перспективи для оптимізації обробки алюмінію для промислових застосувань.

ANNOTATION

Vladislav Hrinchenko

Investigation in situ of the surface of polycrystalline aluminum samples during plastic deformation using a laser with a vertical resonator – Manuscript.

Degree work on obtaining educational qualification level “Master” in the specialty 104 - “Physics and Astronomy” educational and professional program - “Physics” - V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkov, 2024, 25 p, - 12 ris.

The study utilized polycrystalline aluminum samples obtained from aluminum foil subjected to cold rolling. The samples were prepared by annealing to relieve internal stresses, then deformed to a degree of $\varepsilon = 2.5\%$ to alter the average grain size, which facilitated further recrystallization during annealing. The surface of the samples was treated using chemical etching and electrochemical polishing to improve the visual assessment of the grain structure.

The experimental setup provided precise measurements of deformation curves, orientation, and structural changes of the samples using high-speed measurements and recordings. Mechanical tests included active tension at a constant deformation rate. The stiffness of the deformation equipment frame met the standards of large testing machines, ensuring the reliability and accuracy of the obtained data.

Special attention was paid to the interaction of laser radiation with polycrystalline samples, allowing for the analysis of crystallographic orientation and grain structure. Experiments revealed that the properties of quasiperiodic structures depend on grain orientation, as evidenced by specific diffraction patterns.

This research contributes to understanding the influence of mechanical and thermal treatments on the structure and properties of polycrystalline materials, opening new perspectives for optimizing aluminum processing for industrial applications.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	6
1.1. Огляд методів дослідження пластичної деформації	6
1.2. Ключові властивості пластичної деформації:	8
1.3. Лазери	9
2.МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ	166
2.1. Приготування зразків для досліджень	166
2.2 Методика проведення експерименту та опис установки	17
2.3. Взаємодія лазерного випромінювання з різною структурою поверхні зразка.	200
2.4. Формування дифракційних картин	23
Висновки	254
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	25

ВСТУП

Сучасна матеріалознавча промисловість невпинно розвивається, прагнучи оптимізувати властивості металевих матеріалів для різноманітних застосувань. Алюміній, з його винятковими характеристиками легкості, міцності та корозійної стійкості, займає особливе місце серед конструкційних матеріалів у таких галузях, як авіація, автомобілебудування та будівництво. Вивчення мікроструктури алюмінію та впливу на неї різних видів обробок є ключовим для підвищення ефективності його використання.

Полікристалічні матеріали, які представляють собою агломерати мікроскопічних кристалів або зерен, мають складну внутрішню структуру, що визначає їх механічні та фізичні властивості. Структурні зміни в алюмінії в результаті механічної обробки та термічної обробки відіграють критичну роль у формуванні його властивостей. Тому, глибоке розуміння процесів, що відбуваються на мікрорівні під час відпалу, деформування та рекристалізації, є важливим для контролю та покращення характеристик готових виробів.

Метою цієї роботи є дослідження змін у мікроструктурі полікристалічних зразків алюмінію в результаті різних типів механічної та термічної обробки. Особлива увага приділяється аналізу деформаційних картин, що виникають під час одноосьового розтягування, а також вивченню ефекту лазерного випромінювання на кристалографічну орієнтацію зерен. Використання сучасних методів візуалізації, включаючи хімічне травлення та електрохімічне полірування, дозволяє детально розглянути мікроструктурні зміни в матеріалі, що є ключовим для подальшого розширення можливостей їх практичного застосування.

Ця робота відкриває нові перспективи для вдосконалення досліджень алюмінієвих сплавів, що може сприяти розробці нових технологій.

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1. Огляд методів дослідження пластичної деформації

Деформація уособлює фундаментальне поняття в механіці деформівного твердого тіла, що описує зміну його форми та/або розміру під дією зовнішніх сил або інших впливів. Під час деформації відбувається зміна розмірів тіла: довжини, площі, об'єму або кутів тіла. Деформація може бути однорідною або неоднорідною .

При однорідній деформації всі частини тіла деформуються однаково. При такому розподілу деформації коефіцієнт деформації однаковий у всіх точках тіла, лінії деформації прямі та паралельні одна одній, форма тіла змінюється пропорційно. При неоднорідній деформації різні частини тіла деформуються по-різному. При такому розподілу деформації коефіцієнт деформації відрізняється в різних точках тіла, лінії деформації криві або викривлені, форма тіла змінюється не пропорційно.

Деформація класифікується за характером зміни форми, за оборотністю
За характером зміни форми при розтягу,зсуву,згину.крученню.

Розтяг/стиснення - це процеси, коли на об'єкт діють зовнішні сили, що викликають збільшення або зменшення його розмірів у напрямку цих сил.

Зсув - тип деформації, при якому одна частина матеріалу зсувається відносно іншої вздовж площини контакту. Це може відбуватися як у твердих тілах, так і у ґрунтах або породах.

Згин - деформація що відбувається в тілах під дією моментів сил, що викликають вигинання об'єкта. Згин може виникати у тонких структурах, таких як балки або пластина, які витримують навантаження або зовнішні сили.

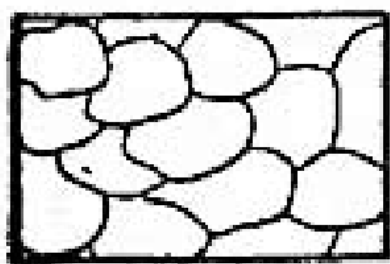
Кручення - це тип деформації, що відбувається, коли на об'єкт діють зовнішні сили, які спричиняють обертання або кручення об'єкта навколо своєї вісі. Це може відбуватися у твердих тілах, які мають пружність, або у рідинних середовищах.

2. За оборотністю:

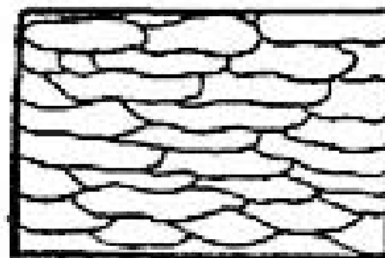
При пружній деформації змінюється форма або розмірів об'єкта під дією зовнішніх сил, яка повністю відновлюється після припинення цих сил. Це означає, що об'єкт повертається до свого початкового стану без будь-яких постійних змін.

При пластичній деформації тіло зазнає залишкової зміни форми після зняття дії сил, що її викликали. На відміну від пружної деформації, яка повністю зникає після припинення навантаження, пластична деформація залишається і призводить до постійного зміщення частинок матеріалу [1, 2].

Ось що відбувається під час пластичної деформації:



До деформації



пластично
деформований
метал

Рис. 1. Пластична деформація на мікроскопічному рівні

На мікроскопічному рівні атоми матеріалу розривають зв'язки зі своїми сусідами та переміщуються на нові позиції. Ці нові позиції, як правило, є більш стабільними під впливом прикладених сил.

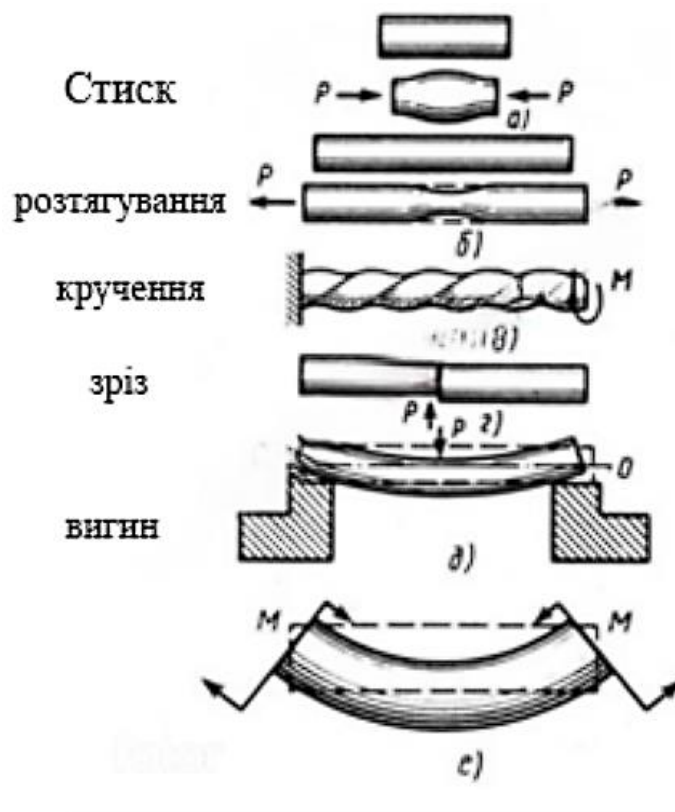


Рис. 2. Пластична деформація на макроскопічному рівні

На макроскопічному рівні пластична деформація проявляється як зміна форми матеріалу. Це може бути подовження, стиснення, зсув або більш складна деформація, залежно від типу навантаження та матеріалу [3].

1.2. Ключові властивості пластичної деформації.

Пластична деформація не зникає після зняття навантаження.

Матеріал не може повністю відновити свою початкову форму після пластичної деформації.

Зміцнення матеріалу. У деяких випадках пластична деформація може призвести до зміцнення матеріалу, явище, відоме як наклеп. Це відбувається тому, що дефекти, які утворюються під час деформації, перешкоджають подальшому руху атомів.

Втома матеріалу. Пластична деформація може призвести до втоми матеріалу, що робить його більш схильним до руйнування під дією циклічних навантажень.

Як різні матеріали реагують на пластичну деформацію:

Метали. Найбільш поширений матеріал, який демонструє значну пластичну деформацію. Вони мають відносно слабкі зв'язки між атомами, що дозволяє їм легко переміщуватися під навантаженням. Залежно від типу металу та температури, пластична деформація може бути суттєвою перед руйнуванням.

Полімери. Деякі полімери також можуть демонструвати пластичну деформацію, особливо за підвищених температур. За нижчих температур вони можуть поводитися більш еластично. Полімери складаються з довгих ланцюгів молекул, які можуть ковзати одна від одної під дією навантаження. Кількість та тип бічних груп на молекулярних ланцюгах впливає на ступінь пластичної деформації, яку може витримати полімер.

Композитні матеріали. Поведінка композитних матеріалів залежить від властивостей компонентів, але вони можуть демонструвати як пружну, так і пластичну деформацію. Наприклад, композит, армований скляним волокном, може демонструвати пружну деформацію в матриці (полімер) і пластичну деформацію у волокнах.

Крихкі матеріали. Так як кераміка і бетон, зазвичай не демонструють значної пластичної деформації перед руйнуванням. Вони, як правило, руйнуються при досить низьких рівнях напруження. Зв'язки між атомами в цих матеріалах дуже сильні, що робить їх стійкими до деформації, але також робить їх більш схильними до крихкого руйнування [3, 4].

1.3. Лазери

Лазери - це пристрої, які генерують інтенсивний, вузькоспрямований пучок світла. Їхня назва походить від англійської аббревіатури "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", що означає "Підсилення світла за допомогою стимульованого випромінювання"[5]

Як працюють лазери:

Активне середовище. Лазер містить активне середовище, яке може бути кристалом, газом, рідиною або напівпровідником. Це середовище містить атоми з певними енергетичними рівнями.

Збудження. Енергія подається в активне середовище, збуджуючи атоми до більш високого енергетичного рівня.

Стимульоване випромінювання. Коли збуджений атом стикається з фотоном певної частоти, він випромінює другий фотон з ідентичною частотою, фазою та напрямком. Цей процес називається стимульованим випромінюванням.

Підсилення. Випромінені фотони стимулюють інші збуджені атоми випромінювати фотони, що призводить до лавиноподібного ефекту. Цей лавиноподібний процес генерує інтенсивний, вузькоспрямований пучок світла.

Дзеркала. Лазер має два дзеркала, які розташовані по обидва боки активного середовища. Ці дзеркала відбивають фотони, змушуючи їх багаторазово проходити через активне середовище, що призводить до ще більшого посилення [8].

Одним із ключових елементів лазера є його резонатор, який визначає основні характеристики променя, такі як його напрямок та структура.

У багатьох лазерних системах використовується резонатор з вертикальною або горизонтальною конфігурацією. Ця конструкція впливає на властивості випромінювання та ефективність лазера.

Резонатор лазера - це система дзеркал, що формує стоячу світлову хвилю в активному середовищі лазера. Він є одним з основних елементів лазера, що забезпечує:

Зворотній зв'язок. Багаторазове проходження світла через активне середовище, що призводить до його посилення.

Вибірковість. Резонатор визначає, які частоти світла можуть існувати в лазері.

Направленість. Резонатор формує пучок лазерного випромінювання.

Типи резонаторів:

Плоско-паралельний. Два плоских дзеркала, розташовані паралельно один одному.

Сферичний. Два сферичних дзеркала.

Концентричний. Одне сферичне дзеркало і одне плоске дзеркало.

З нелінійними елементами: містять нелінійні оптичні елементи, які змінюють властивості світла.

Лазер з горизонтальним резонатором - це тип лазера, де активне середовище розташоване горизонтально, а резонатор формується дзеркалами, розташованими по обидва боки від нього.

Лазери з вертикальним резонатором є особливим типом напівпровідникових лазерів, які відрізняються своєю конструкцією та характеристиками випромінювання.

Основна особливість лазерів з вертикальним резонатором полягає в тому, що напрямок випромінювання відбувається перпендикулярно до поверхні активного напівпровідникового шару. Це досягається завдяки спеціальній конструкції, в якій дзеркала, що утворюють оптичний резонатор, розміщені паралельно до напрямку зростання кристалу. Ця конфігурація забезпечує ефективну генерацію випромінювання у вертикальному напрямі.

Лазерна інтерферометрія є високоточним методом вимірювання мікроскопічних змін у структурі матеріалу. Цей метод дозволяє аналізувати розподіл напруги у матеріалі, відслідковувати формування та розвиток дислокацій, а також вивчати процеси рекристалізації та відновлення структури після деформації. Лазерна інтерферометрія особливо важлива для вивчення динаміки деформаційних процесів у реальному часі [7].

Лазерна абляція дозволяє точно впливати на матеріал, створюючи контрольовані дефекти на його поверхні. Цей метод використовується для вивчення впливу мікрodefektів на процеси пластичної деформації та механічні властивості матеріалу. Лазерна абляція також застосовується для аналізу механізмів формування та розвитку дислокаційних структур у матеріалі.

Лазерна ультразвукова томографія є одним із найбільш перспективних методів для дослідження внутрішньої структури матеріалів. За допомогою цього методу можна отримувати тривимірні зображення внутрішньої структури матеріалу, виявляти області з підвищеною концентрацією дефектів та аналізувати взаємозв'язок між мікроструктурою та макроскопічними механічними властивостями.

Для вивчення процесу виникнення та еволюції дислокаційного ковзання, що визначає трансляційну моду пластичної деформації в зразці, пропонується методика, що використовує розсіювання монохроматичного випромінювання поверхнею зразка. Цей підхід дозволить в реальному часі відстежувати зміни на поверхні кристалічних матеріалів, які представляють собою набір квазіперіодичних ліній ковзання, що виникають при виході дислокацій на поверхню зразка під час пластичної деформації.

В якості джерела монохроматичного випромінювання слугує He-Ne лазер.

Лазери на основі гелію-неону (He-Ne) є одними з найпоширеніших газових лазерів, що використовуються для створення монохроматичного випромінювання. Вони працюють на принципі випромінювання збудженого атома гелію, який передає свою енергію атому неону, що при цьому випромінює фотони з визначеними довжинами хвиль, що відповідають специфічним лініям спектру емісії газу.

Лазери He-Ne мають високу стабільність та довгий термін служби, а також мають монохроматичне випромінювання, що означає, що вони випромінюють світло практично одного колірному спектру [5].

На рисунку 3 показана конфігурація експерименту з вивчення структури деформаційного рельєфу під час деформування з використанням лазерного випромінювання. Зразок, закріплений у захватах деформуючого пристрою, освітлюється пучком випромінювання від лазера He-Ne через отвір у екрані. Розсіяний пучок відображається на екрані у вигляді картини розсіювання, яка використовується для аналізу деформаційного рельєфу поверхні зразка.

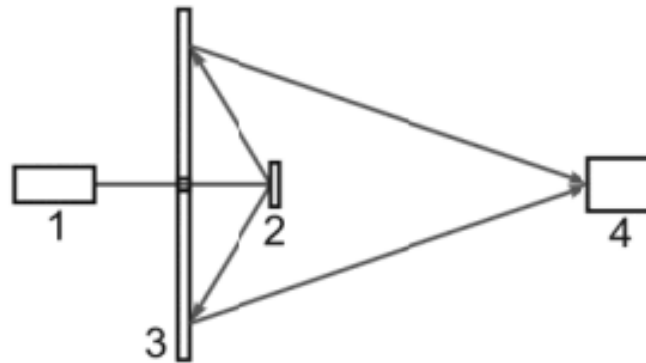


Рис. 3. Схема установки для реєстрації розсіювання лазерного випромінювання поверхнею зразка: 1 – лазер; 2 – зразок; 3 – екран з отвором; 4 – цифрова камера

В експерименті, проведеному з використанням лазерної інтерферометрії, було показано, як локальне вплив лазерного випромінювання на алюмінієвий зразок призводить до зміни розподілу напруг і формування нових дислокаційних структур. Це дослідження демонструє можливості лазерної інтерферометрії в аналізі динаміки деформаційних процесів на мікрорівні і дозволяє краще зрозуміти механізми зміцнення і руйнування матеріалу під впливом зовнішніх навантажень.

У іншому дослідженні була досліджена ефективність застосування лазерної абляції для вивчення впливу мікрodefektів на процеси пластичної деформації в алюмінієвих сплавах. Результати показали, що створення контрольованих defektів за допомогою лазерної абляції дозволяє досліджувати механізми зміцнення і руйнування матеріалу на мікрорівні, що має важливе значення для розробки нових сплавів з покращеними механічними властивостями [6].

Дослідження, у якому використовувалася лазерна ультразвукова томографія, показало можливості цього методу в виявленні внутрішніх defektів в алюмінієвих зразках після пластичної деформації. За допомогою тривимірних зображень були ідентифіковані області з підвищеною концентрацією мікротріщин і включень, що надає цінну інформацію для оптимізації процесів обробки алюмінію та підвищення його міцносних характеристик

Лазерні методи дослідження дозволяють не лише аналізувати вже відбувші зміни у матеріалі, але й передбачати майбутню поведінку матеріалу під впливом різних факторів. Наприклад, за допомогою лазерної інтерферометрії можна оцінювати ступінь зміцнення матеріалу в процесі деформації та передбачати його механічні властивості за різних умов експлуатації [7, 8].

Лазерна абляція знаходить застосування не лише у створенні контрольованих дефектів, а й у вивченні процесів самоорганізації в металах і сплавах під час пластичної деформації. Це дозволяє розробляти нові підходи до управління механічними властивостями матеріалів, підвищуючи їх міцність та довговічність.

Лазерна ультразвукова томографія, завдяки своїй здатності створювати тривимірні зображення внутрішньої структури матеріалу, дозволяє досліджувати взаємозв'язок між мікроструктурою та макроскопічними механічними властивостями. Це дає можливість оптимізувати процеси обробки матеріалів для досягнення бажаних характеристик.

Лазерне індуковане нагрівання є ще одним важливим методом у дослідженні пластичної деформації. Цей метод дозволяє локалізовано нагрівати області матеріалу, викликаючи термічно індуковані деформації. Дослідження з використанням лазерного індукованого нагрівання допомагають зрозуміти вплив температури на процеси пластичної деформації та механічні властивості матеріалів.

Лазерна мікрообробка є методом, який дозволяє проводити точну та контрольовану обробку матеріалів на мікрорівні. Цей метод знаходить застосування у створенні мікроструктур та мікромеханічних елементів, які можуть бути використані для вивчення механізмів пластичної деформації в умовах високої ступені мініатюризації.

Лазерна доплерівська віброметрія є ще одним корисним інструментом для дослідження пластичної деформації. Цей метод дозволяє вимірювати вібрації та динамічні характеристики матеріалів з високою точністю.

Дослідження, проведені за допомогою лазерної доплерівської віброметрії, допомагають зрозуміти вплив динамічних навантажень на процеси пластичної деформації та втомні властивості матеріалів.

Результати досліджень пластичної деформації за допомогою лазерних методів мають важливе практичне значення. Вони можуть бути використані у різних галузях, включаючи авіаційну та космічну промисловість, автомобілебудування, машинобудування та медицину. Наприклад, розуміння механізмів пластичної деформації та втомного руйнування матеріалів дозволяє розробляти більш надійні та довговічні конструкційні елементи для авіаційних та космічних апаратів.

У автомобілебудуванні результати таких досліджень можуть бути використані для оптимізації процесів штампування та формування металевих деталей, а також для підвищення безпеки автомобілів за рахунок розробки матеріалів з покращеними енергопоглинаючими властивостями.

У медицині розуміння процесів пластичної деформації важливе для розробки імплантатів та хірургічних інструментів, які піддаються значним механічним навантаженням під час експлуатації. Дослідження у цій області сприяють створенню біосумісних матеріалів з оптимальними механічними властивостями для медичних застосувань.

Лазерні методи дослідження пластичної деформації є потужним інструментом для аналізу мікроструктурних змін у матеріалах. Вони дозволяють проводити неруйнівний контроль та отримувати детальну інформацію про процеси деформації, що сприяє розробці більш надійних та довговічних матеріалів для різних промислових та медичних застосувань.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

2.1. Приготування зразків для досліджень

Об'єктом дослідження були обрані полікристалічні зразки алюмінію. Початковим матеріалом була фольга алюмінію, яка отримана холодною прокаткою. Її товщина складала 0,15 мм, чистота на рівні 99,96%. Для дослідження з цієї фольги підготовлювали зразки розмірами 100×20 мм. Зразки проходили попередній відпал при $T = 300$ °C протягом 2 години для зняття напружень, отриманих під час виготовлення зразків. Після цього зразки Al відпалювали в печі при $T = 400$ °C протягом 2 годин. Після цього кожен зразок було піддано деформації до ступеня $\varepsilon = 2,5$ % за умови одноосьового розтягування. Ступінь деформації має прямий вплив на середній розмір зерен, які утворюються після рекристалізації. Далі зразки розміщувалися в муфельній печі для повторного відпалу при $T = 600$ °C протягом 2 годин, створивши умови для розвитку збиральної рекристалізації. Обрані полікристалічні зразки алюмінію, які були попередньо поліровані пастою «ДОІ». Для виявлення границі та зеренної структури полікристалів використовувався травильний розчин Келлера, який складався з різних складових, таких як: 30 мл HCl, 20 мл HNO₃, 5 мл HN та 30 мл H₂O, з часом травлення 1,5 хвилини травлення зразків проводилось за кімнатної температури. Після чого зразки ретельно промивалися дистильованою водою, та були залишені на деякий час для висихання. Для видалення дрібних подряпин з зразка застосовувався електрохімічний метод полірування. Оброблюваний зразок був анодом, з'єднаним з джерелом струму (випрямляч, тип ВСА – 111К), розміщували в ванну з електролітом, де другий електрод – мідний катод. Склад електроліту: 6 г CrO₃, 60 г H₃PO₄, 50 г H₂O ($T = 60$ °C, $U = 3V$, $t = 2$ хв, $j = 10$ А/Дм², у свіжому приготованому розчині).

На рисунку 4. показано приклад типового зразка алюмінію.



Рис. 4. Фотографія поверхні полікристалічного зразка алюмінію після хімічного травлення (а) та після шліфування й полірування (б).

2.2. Методика проведення експерименту та опис установки

Усі зразки піддавалися механічним випробуванням за умовами активного розтягу з постійними параметрами деформації $\epsilon = 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ при кімнатній температурі. Процес реєстрації деформаційних кривих, а також орієнтаційних і структурних змін, що виникали під час пластичної деформації, здійснювався використанням стандартної методики, яка включала освітлення та записування даних за допомогою WEB-камери та персонального комп'ютера. Експерименти проводилися на апараті, спеціально розробленому кафедрою.

Стосовно досліджуваних зразків, жорсткість рами деформаційного обладнання становила $\lambda_{\text{обр}}=2,1 \text{ кН/мм}$, що узгоджується з параметрами відомих деформаційних установок, таких як Instron 8801 (жорсткість рами $\lambda=390 \text{ кН/мм}$), MTS 810 (жорсткість рами $\lambda=260 \text{ кН/мм}$), WDW 50E (жорсткість рами $\lambda=250 \text{ кН/мм}$) і WDW 5E (жорсткість рами $\lambda=80 \text{ кН/мм}$).

Під час калібрування встановлено, що деформаційний апарат здатен розвивати зусилля близько 200 кг. При тестуванні завжди використовувалася фольга товщиною 0,15 мм, зразки фіксувалися за допомогою спеціальних профільних захоплень. Загальні результати досліджень виявили, що руйнування найчастіше відбувалося у робочій частині зразка. Для вимірювання деформаційного напруження використовувалася стандартна

схема з чотирма тензодатчиками (два для робочих вимірів і два для компенсації температурних відхилень), приклеєними до пружного елемента 1.



Рис. 5. Зовнішній вигляд захватів

Систему живлення забезпечував літій-іонний акумулятор високої ємності, який мав показники 20 А/год та напругу 5 В. Споживання струму тензодатчиками складало 8 мА. Зміна напруги не перевищувала 0,1 мкВ/год, що забезпечувало стабільність необхідну для точного вимірювання деформаційного напруження з точністю до ± 1 г/мм²

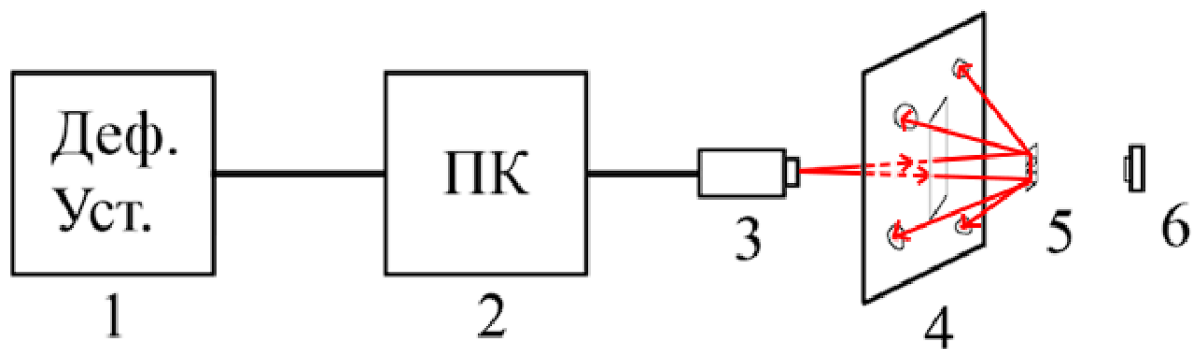


Рис. 6. Схема проведення експерименту:

1 - диференційний пристрій ; 2 - програмне забезпечення; 3 - He-Ne лазер; 4 - розсіюванні промені; 5 - зразок; 6 - цифрова WEB-камера

Схема включає два блоки та набір програмного забезпечення. Перший блок виконує функцію реєстрації деформаційної кривої ($\sigma = \sigma(\epsilon)$), в той час як

другий блок використовується для спостереження за орієнтаційними та структурними змінами *in situ* під час пластичної деформації. Склад системи охоплює: 1 - диференційний пристрій ; 2 - програмне забезпечення; 3 - He-Ne лазер; 4 - розсіювані промені; 5 - зразок; 6 - цифрова WEB-камера. Вся інформація передається до програмного комплексу.

В якості джерела монохроматичного випромінювання використовувався лазер PROTESTER LL605R (рис. 7.). Лазер має вертикальну синхронізацію випромінювання. Довжина хвилі 635 нм. Товщина пучка лазеру становить 1 мм, та висото вертикального лінійного розповсюдження складає 3 м.



Рис. 7. He-Ne лазер PROTESTER LL605R

Для реєстрації сигналу, що виникає при деформації пружного елемента і пропорційний деформаційному напруженню, використовувався цифровий мультиметр UNI-T UTM1804. Цей мультиметр має USB-порт, що дозволяє передавати дані у вигляді напруги (у мілівольтах), пропорційно зусиллю, безпосередньо на комп'ютер з частотою 10 вимірювань в секунду. Таким чином, використовувана схема реєстрації уникнула недоліків стандартних

методів, які включають самописці з недостатньою швидкістю, дрейфом нуля та похибками реєстрації сигналу. Деформаційна крива була записана в ПК в координатах $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, а механічні характеристики (такі як межа міцності σ_B , умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$, максимальна деформація до руйнування ε_{max} і коефіцієнт деформаційного зміцнення θ) автоматично визначалися за цією кривою. Такий підхід дозволив отримати більш точні та надійні дані про механічні властивості матеріалу.

Для побудови деформаційної кривої у координатах "напруження - деформація" потрібно мати інформацію про швидкість переміщення захвату, площу перерізу зразка і коефіцієнт переведення значень в мікрівольтах в кілограми (рівний F / S , де $F = U \times k$, а $k = 0,1$). Форма деформаційної кривої показана на рисунку 8.

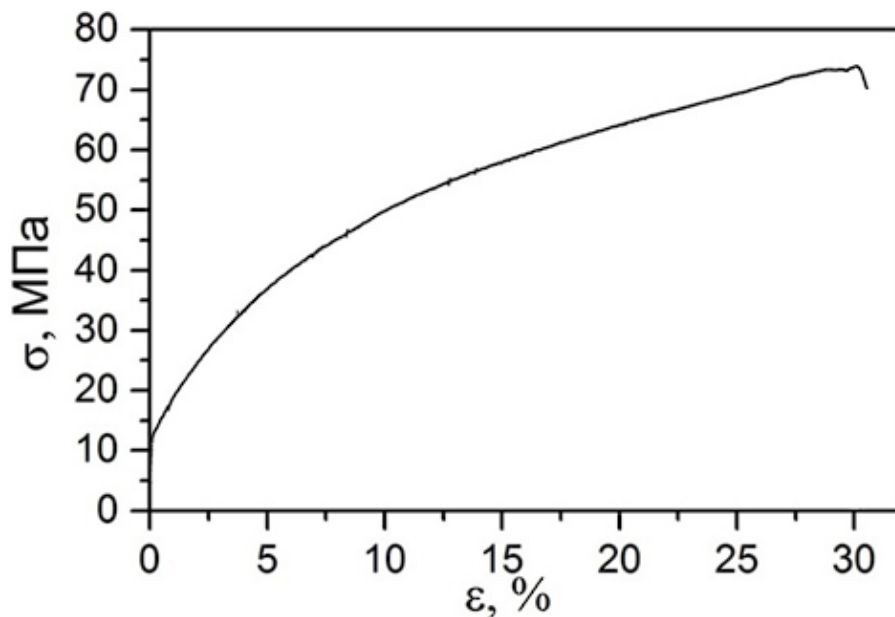


Рис. 8. Деформаційна крива отримання для двовимірних полікристалічних зразків алюмінію.

2.3. Взаємодія лазерного випромінювання з різною структурою поверхні зразка.

Монохроматичне випромінювання лазерного променя взаємодіє з поверхнею зразка, змінюючи напрямок дифрагованого променя в залежності від типу квазіперіодичного рельєфу. Перед аналізом рельєфу

полікристалічного зразка проводилося вивчення різних структур його поверхні (див. рисунок 9).

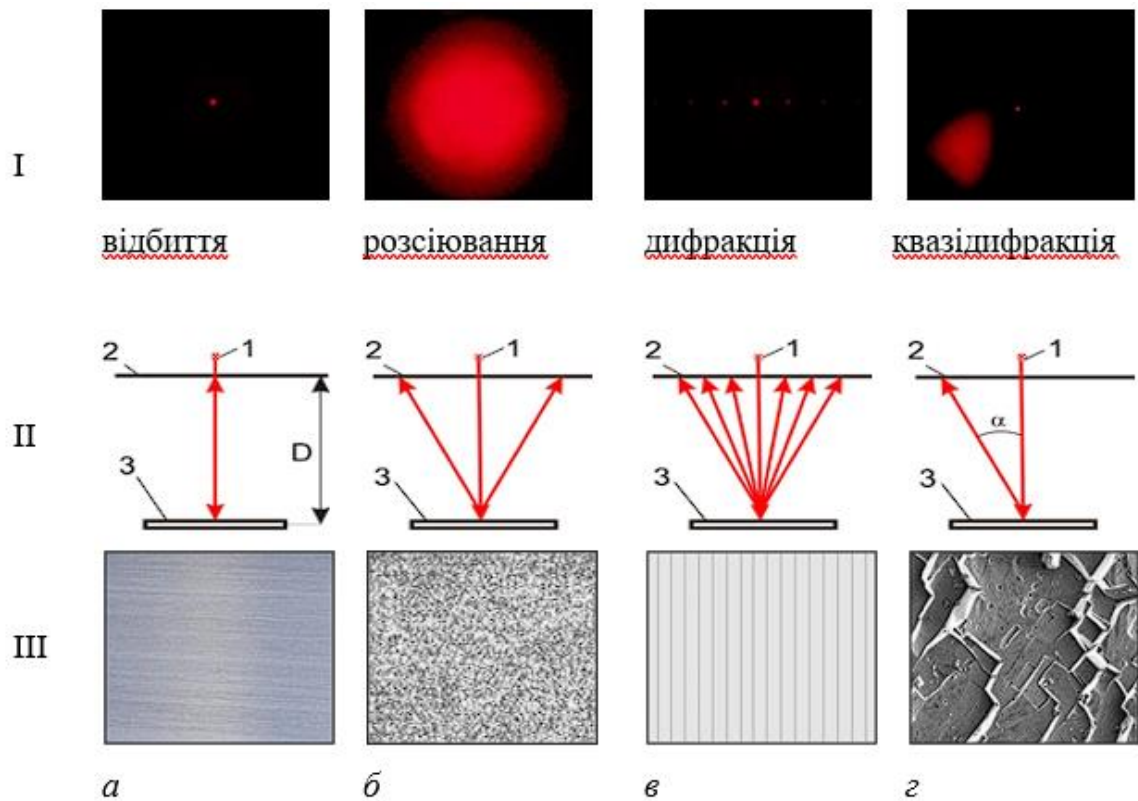


Рис. 9. Картини розсіювання лазерного пучка від поверхні із різною структурою (I). Хід променів, відбитих від поверхні зразка (II): 1 – джерело лазерного випромінювання, 2 – екран, 3 – зразок. Мікрофотографії поверхні зразків (III): а - полірований зразок, б - дрібнозернистий зразок ($d = 0,01$ мм), в – дифракційна решітка, г – квазіперіодична структура поверхні зерна. $D = 30$ см (Відстань між зразком та екраном).

Дослідження з використанням вертикального лазерного променя використовується наступним чином. Лазер налаштовується так, що він падає перпендикулярно на поверхню полікристалічного зразка алюмінію. Відбите світло спрямовується на екран, де його фіксує фотокамера (схема використання лазера приведена на рисунку 9). Коли лазер освітлює поліровану поверхню зразка, відбитий промінь створює дзеркально відбиту видиму лінію на екрані. При взаємодії лазерного променя з квазіперіодичною структурою,

яка утворюється після хімічного травлення, відбите світло розповсюджується на екран під певним кутом (α) в залежності від кристалографічної орієнтації.

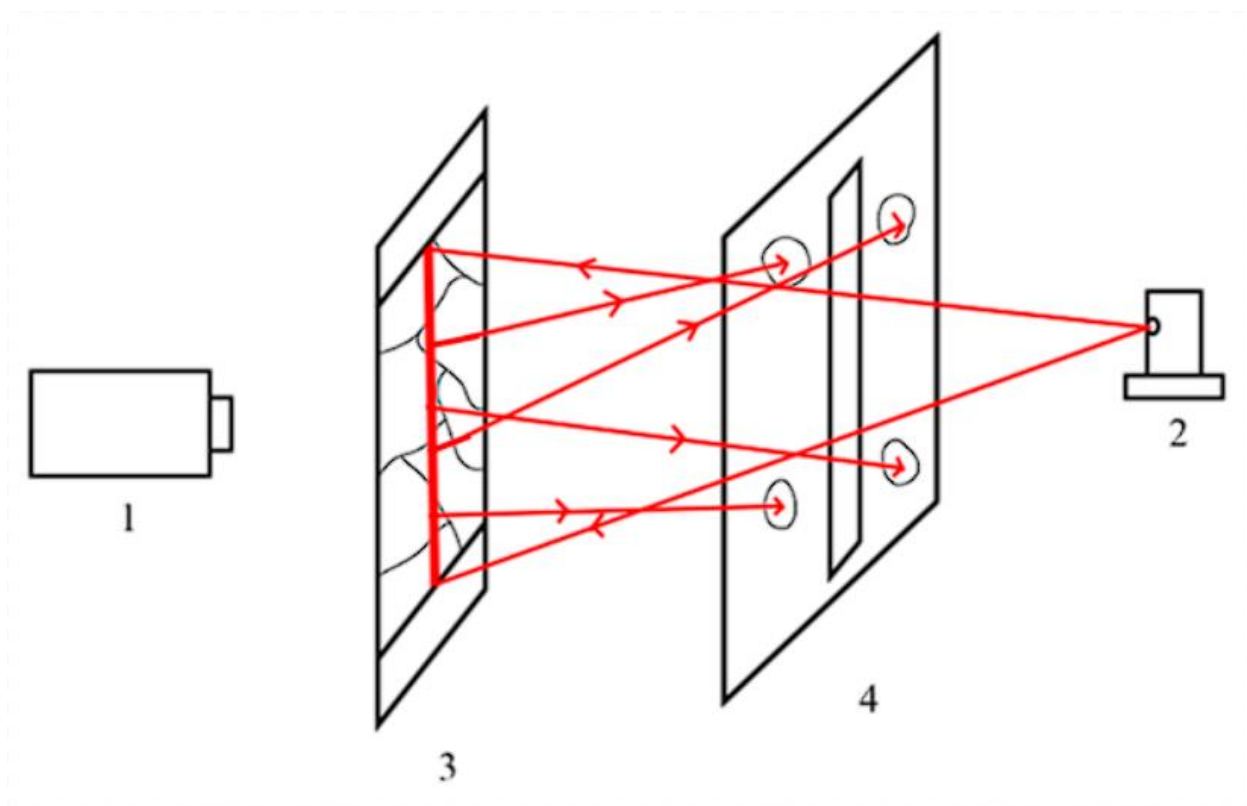


Рис. 10. Схема проведення експерименту з використанням лазера: 1 - камера; 2 - лазер; 3 - зразок; 4 - екран діафрагма.

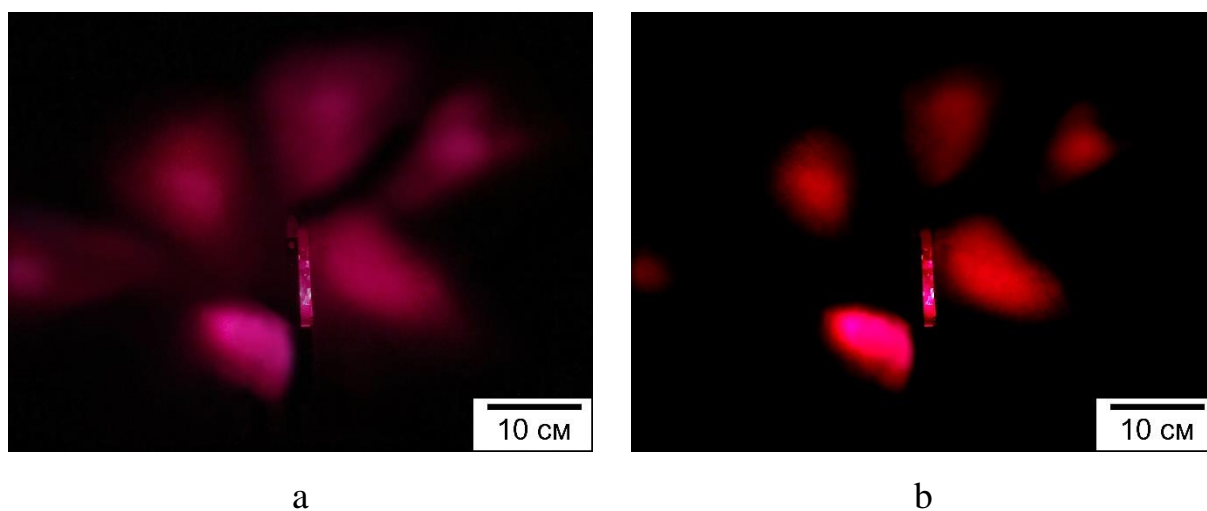


Рис. 11. Дифракційна картина, отримана в результаті дифракції лазерного випромінювання лазера з вертикальним резонатором на квазіперіодичній структурі. а) фотографія дифракційна картини від поверхні полікристалічного зразку алюмінію при попаданні лазера одночасно на 6 зерен, вздовж напрямку

розтягування зразка. б) фотографія, яка отримана після комп'ютерної обробки за допомогою інструменту по зміні інтенсивності світла.

При аналізі квазіперіодичної структури полікристалічного зразка алюмінію застосовується лазер, чий пучок послідовно спрямовується на поверхню кожного зерна. Лазерне світло слугує джерелом даних про кристалографічні орієнтації зерен.

Результати експериментів демонструють, що особливості квазіперіодичної структури тісно пов'язані з кристалографічною орієнтацією зерен. Відповідно, кут α , під яким відбивається лазерний пучок, залежить від характеристик цієї структури та орієнтації зерен на поверхні.

2.4. Формування дифракційних картин

Під час деформації, по поверхні полірованого зразка проводилося сканування лазером вздовж осі розтягнення із швидкістю 3 мм/с. На рисунку 12 наведено зображення розсіювання лазерного променя, отримані в точках 1 (зерно 1), 2 (зерно 2), 3 (зерно 3), 4 (зерно 4), 5 (зерно 5), 6 (зерно 6).

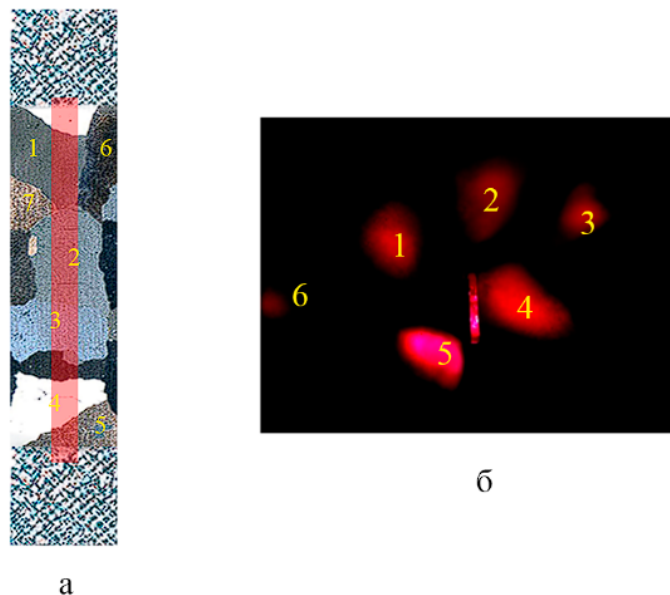


Рис. 12. На рисунку показано зразок (а) з зернами отриманими за допомогою травлення та дифракційна картина (б), отримана в результаті дифракції

лазерного випромінювання лазера з вертикальним резонатором на квазіперіодичній структурі.

Висновки:

1. Розроблена лазерна методика, яка дозволяє одночасно слідкувати за орієнтацією кристалів, в процесі пластичної деформації, за допомогою лазера, який має вертикальне розсіювання випромінювання вздовж певного напрямку.
2. Експериментально показано, що, при взаємодії лазерного випромінювання з поверхнею кожного із зерен, виникає ефект дифракції. Дифракційні картини на квазіперіодичній структурі вказують на залежність від кристалічної орієнтації.
3. Вперше проведені дослідження поверхні полікристалічних зразків алюмінію за допомогою лазера з вертикальним розсіюванням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Brandon D. G. The structure of high-angle grain boundaries // *Acta met.* – 1966. – V. 14. – P. 1479-1484.
2. Serra A., Pond R. C., Bacon D. J. Computer Simulation of the Structure and Mobility of Twinning Dislocations in H.C.P. Metals // *Acta Metall. Mater.* – 1991. – Vol. 39. – P. 127-134.
3. Babyak W. J., Rhines F. N. The relationship between the boundary area and hardness of recrystallized cartridge brass // *Trans. Met. Soc. AIME.* – 1960. – Vol. 218. – P. 281-287.
3. Taylor G.I. Plastic strain in metals / G.I. Taylor // *J. Inst. Metals.* – 1938. – V. 62. – P. 302–304.
4. Bishop I.F.W. A theoretical derivation of the plastic properties of polycrystalline face-centred metal / I.F.W. Bishop, R.A. Hill // *Phil. Mag.* – 1951. – V. 42. – P. 1298-1307.
5. Phipps, C. Review: Laser-Ablation Propulsion / Claude Phipps [et. al.] // *Journal of propulsion and power.* — Vol. 26, № 4. July-Aug. — 2010.
6. Leffers T. A Modified Sachs Approach to the Plastic Deformation of Polycrystals as a Realistic Alternative to the Taylor Model / T. Leffers // *Strength of Metals and Alloys: Pros. of 5-th Int. Conf. Aachen.* – 1979. – V. 2. – P. 769-774.
7. R. Kulkarni and P. Rastogi, “Simultaneous estimation of multiple phases in digital holographic interferometry using state space analysis,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 104, pp. 109–116, 2018.
8. M. Sanayei and M. J. Saletnik, “Parameter estimation of structures from static strain measurements. I: formulation,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 122, no. 5, pp. 555–562, 1996.