

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

«Допущено до захисту»

В. о. завідувача кафедри фізики твердого тіла
проф. Зиман З.З _____

«___» грудня 2025 р.

Оцінка «___»

Голова ДЕК _____

«___» грудня 2025 р.

Савуцька Дар'я Володимирівна

**Дослідження термомеханічної обробки та її ролі у формуванні
зеренної структури й механічних властивостей полікристалічних
зразків алюмінію**

Кваліфікаційна робота
на здобуття освітнього ступеня
«Магістр» за спеціальністю
104 Фізика та астрономія освітньо-
професійна програма «фізика»

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

Рецензент :
кандидат фіз.-мат. наук
доц. С. Лебедев

Харків 2025

АНОТАЦІЯ

Савуцька Д.В. Дослідження термомеханічної обробки та її ролі у формуванні зеренної структури й механічних властивостей полікристалічних зразків алюмінію – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 104 Фізика та астрономія освітньо-професійна програма «фізика».
– Харків: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2025.
– 34 с., – Іл. 12.

У магістерській роботі досліджено вплив термомеханічної обробки на формування зеренної структури та механічні властивості двовимірних полікристалічних зразків алюмінію. Робота виконана з використанням комплексу експериментальних методів, що включають металографічний аналіз, оптичну мікроскопію, механічні випробування на одноосьовий розтяг, а також *in situ* спостереження процесів деформації та зародження тріщин.

Встановлено закономірності впливу температурно-деформаційних параметрів термомеханічної обробки на середній розмір зерен, характер пластичної деформації та граничні механічні характеристики матеріалу. Показано, що зі збільшенням середнього розміру зерен максимальна деформація до руйнування зростає, а механізм руйнування змінюється від міжзеренного до транскристалітного.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для оптимізації режимів термомеханічної обробки алюмінію та прогнозування його механічної поведінки в умовах експлуатаційних навантажень. Результати роботи мають наукову новизну та можуть бути застосовані в матеріалознавстві, фізиці твердого тіла й при дослідженнях тонколистових та фольгових алюмінієвих матеріалів.

Ключові слова: пластична деформація, двовимірні полікристали алюмінію, зеренна структура, механічні властивості, термомеханічна обробка.

ANNOTATION

Savutska D.V. Investigation of thermomechanical treatment and its role in the formation of grain structure and mechanical properties of polycrystalline aluminum samples. – Manuscript.

Qualification work for obtaining the educational degree “Master” in the specialty 104 Physics and Astronomy educational and professional program "Physics" – Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2025. – 34 p, – Fig. 12.

In the master’s thesis, the effect of thermomechanical processing on the formation of the grain structure and mechanical properties of two-dimensional polycrystalline aluminum samples is investigated. The work was carried out using a set of experimental methods, including metallographic analysis, optical microscopy, uniaxial tensile mechanical testing, as well as *in situ* observations of deformation processes and crack initiation.

Regularities in the influence of temperature–deformation parameters of thermomechanical processing on the average grain size, the nature of plastic deformation, and the limiting mechanical characteristics of the material were established. It was shown that with an increase in the average grain size, the maximum strain to failure increases, and the fracture mechanism changes from intergranular to transcrystalline.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of their use for optimizing thermomechanical processing regimes of aluminum and for predicting its mechanical behavior under service loading conditions. The results of the work have scientific novelty and can be applied in materials science, solid-state physics, and in studies of thin-sheet and foil aluminum materials.

Keywords: plastic deformation, two-dimensional aluminum polycrystals, grain structure, mechanical properties, thermomechanical treatment.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ АЛЮМІНІЮ	6
1.1. Фізичні властивості алюмінію та особливості його полікристалічної структури	6
1.2. Основи термомеханічної обробки: сутність, види та закономірності процесів	15
1.3. Вплив термомеханічної обробки на формування зеренної структури та механічні властивості алюмінію	17
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	20
2.1. Підготовки зразків та дослідження зеренної структури	20
2.2. Механічні випробування зразків	22
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	27
3.1. Особливості експериментальних досліджень процесу деформування двовимірних полікристалів	27
3.2. Вплив зеренної структури на характер деформування двовимірних полікристалів алюмінію	28
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	33

ВСТУП

Алюміній та його сплави посідають одне з провідних місць серед конструкційних матеріалів завдяки поєднанню низької густини, високої корозійної стійкості, достатньої пластичності та можливості спрямованого регулювання механічних властивостей. У зв'язку з розвитком авіаційної, автомобільної, космічної, електротехнічної та будівельної галузей, потреба у високоякісних алюмінієвих матеріалах з прогнозованими структурно-механічними характеристиками постійно зростає, що зумовлює актуальність дослідження термомеханічної обробки як універсального інструмента формування оптимальної зеренної структури. Саме контрольована комбінація термічного впливу та пластичної деформації дозволяє змінювати внутрішню будову полікристалічного алюмінію, що безпосередньо визначає його експлуатаційні властивості.

Питання впливу термомеханічної обробки на структуру та властивості алюмінію досліджуються у працях провідних вітчизняних і зарубіжних матеріалознавців. Вагомий внесок у вивчення процесів рекристалізації, наклепу та полігонізації зробили такі науковці, як Г. В. Курдюмов, А. А. Бочвар, Дж. Хірш, Л. Хансен, Р. Рід, Дж. Гладман, які розглядали механізми формування зеренної структури та взаємозв'язок між структурною еволюцією і механічними властивостями легких металів. Значущими є роботи В. П. Мельника, О. М. Вороніна, Є. І. Протасова, що присвячені рольовим особливостям температурних та деформаційних параметрів у розвитку мікроструктурних перетворень у металевих матеріалах. Сучасні концепції інтенсивної пластичної деформації та отримання ультрадрібнозернистих структур активно розвиваються у працях Р. З. Валєєва, Т. Г. Лангдона, В. В. Протасова.

Складність процесів, які відбуваються в алюмінії при термомеханічній обробці, зумовлена великою кількістю чинників, що впливають на формування зеренної структури: температура, швидкість деформації, тривалість витримки,

швидкість охолодження. Незважаючи на значну кількість наукових робіт, залишається недостатньо вивченим комплексний вплив цих параметрів на механічні властивості полікристалічного алюмінію та закономірності зеренної еволюції за різних режимів обробки.

Мета роботи полягає у визначенні ролі термомеханічної обробки у формуванні зеренної структури та механічних властивостей полікристалічних зразків алюмінію, а також у встановленні оптимальних умов обробки для отримання від дрібнозернистої до крупнокристалічної структури.

РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ АЛЮМІНІЮ

1.1. Фізичні властивості алюмінію та особливості його полікристалічної структури

Алюміній є легким металом, який вирізняється низькою густиною та високою пластичністю. Він добре проводить тепло і електричний струм, має високу корозійну стійкість завдяки утворенню на поверхні тонкої оксидної плівки, яка захищає від подальшого окиснення [1]. Метал характеризується низькою температурою плавлення, близько 660°C , що забезпечує можливість легкого термічної обробки [2]. Алюміній має високу теплоємність і малий модуль пружності, що впливає на його здатність до деформаційного зміцнення [3].

На рис. 1. представлено послідовність основних мікроструктурних процесів, що відбуваються під час термомеханічної обробки:

- накопичення дислокацій під час деформації;
- процеси відновлення – зниження дефектності кристалічної решітки;
- статична та динамічна рекристалізація, що приводять до формування нових рівноважних зерен;

– укрупнення або стабілізація зеренної структури залежно від температури та часу.

Таку послідовність детально описано в роботах Punyafu J. та Singh G., де наголошено, що саме поєднання температури та швидкості деформації визначає кінцевий розмір зерен та механічні характеристики матеріалу.



Рис. 1. Мікροструктурні перетворення під час термомеханічної обробки алюмінію

Дослідження термомеханічної обробки алюмінієвих сплавів, проведені різними авторами, однозначно підтверджують, що саме зміна зеренної структури визначає комплекс механічних властивостей полікристалічних зразків. За даними Singh G., оптимальні режими термомеханічної обробки забезпечують зменшення середнього розміру зерна у 5–20 разів залежно від сплаву і методу деформації, що прямо корелює зі зростанням межі текучості та твердості.

Punyafu J. встановив, що в процесі інтенсивної пластичної деформації матеріалів та подальшого контрольованого відпалу формується стабільна субмікронна структура, здатна витримувати нагрівання без значного росту зерен. Це пов'язано з накопиченням дрібнодисперсних частинок, які фіксують межі зерен і запобігають їх укрупненню.

За даними Rutherford B., механічні властивості алюмінієвих сплавів після ТМО покращуються:

- межа текучості підвищується на 30–70%;
- твердість збільшується на 20–50%;
- при правильному виборі температури та швидкості деформації зберігається достатня пластичність.

SEM/EBSD-дослідження, опубліковані на платформі ResearchGate, підтверджують формування рівномірної дрібнозернистої структури після ECAP, катання та FSP, що забезпечує покращення трибологічних, корозійних та ударних характеристик матеріалу.

Таким чином, узагальнення літературних даних дозволяє зробити висновок, що термомеханічна обробка є ключовим інструментом для контролю зеренної структури алюмінію, а отримані мікроструктури визначають міцність, пластичність і довговічність полікристалічних зразків.

Особливістю алюмінію є його полікристалічна структура, яка формується з окремих зерен кристалічної решітки, що відрізняються орієнтацією кристалографічних площин. Зерна мають тенденцію до росту при підвищених температурах, а їхній розмір і форма безпосередньо впливають на механічні властивості металу, зокрема міцність, пластичність та ударну в'язкість [4]. В умовах термомеханічної обробки зеренна структура перебуває в динамічній рівновазі між процесами наклепу, полігонізації та рекристалізації, що дозволяє змінювати властивості матеріалу [5].

Алюміній демонструє відносну хімічну інертність у звичайних умовах, однак у присутності лужних металів або кислих розчинів можливі реакції з утворенням гідроксидів і солей [6]. Полікристалічна структура алюмінію характеризується високим ступенем дислокаційної рухливості, що забезпечує ефективне розподілення деформацій при пластичній обробці [7]. Структура може мати різну текстуру в залежності від способу виробництва та термічного режиму обробки, а наявність дефектів кристалічної решітки, включаючи вакансії та зміщення, визначає механізми зміцнення матеріалу [8].

Зерна алюмінію мають кубічну гранецентровану решітку (ГЦК), що зумовлює високу пластичність і можливість деформаційного зміцнення без значного крихкого руйнування [9]. Полікристалічний стан також забезпечує анізотропію механічних властивостей, тобто залежність міцності та пластичності від орієнтації зерен [10]. Структурна однорідність і розмір зерен є ключовими параметрами, які впливають на текучість матеріалу, опір руйнуванню та інші важливі експлуатаційні характеристики [11].

Крім того, полікристалічний алюміній відрізняється здатністю до самовідновлення структури при термічній обробці за рахунок дифузійних процесів у кристалічній решітці, що дозволяє формувати дрібнозернисту рівноважну структуру і підвищувати межу текучості та міцність [12]. Висока корозійна стійкість, низька щільність і здатність до пластичної деформації роблять алюміній одним із найбільш універсальних конструкційних матеріалів у сучасній промисловості [13].

Для вивчення впливу термомеханічної обробки на структуру та механічні властивості полікристалічних металів доцільно використовувати сучасні наукові підходи, засновані на комбінованому аналізі експериментальних і моделювальних даних. Наприклад, Zhao H., Cheng J., Zhao C. та ін. у статті розглядають сучасний стан розробки біомедичних магнієвих (Mg) сплавів, їх термомеханічної обробки, а також практичне застосування у медицині. Їх широке

використання обмежується низькою корозійною стійкістю та недостатньою механічною міцністю для тривалого функціонування в умовах навантаження [7].

Оптимізація складу та мікроструктури Mg-сплавів (Рис. 2). Одним із ключових результатів є встановлення того, що склад сплаву істотно визначає мікроструктуру, механічні властивості, корозійну поведінку. Автори узагальнили дані про те, що додавання легуючих елементів (Zn, Ca, Mn) сприяє формуванню дисперсних вторинних фаз, які підвищують межу текучості і загальну міцність. Натомість надмірне введення рідкісноземельних елементів може покращувати корозійну стійкість, але водночас створювати потенційно небажані вторинні фази.

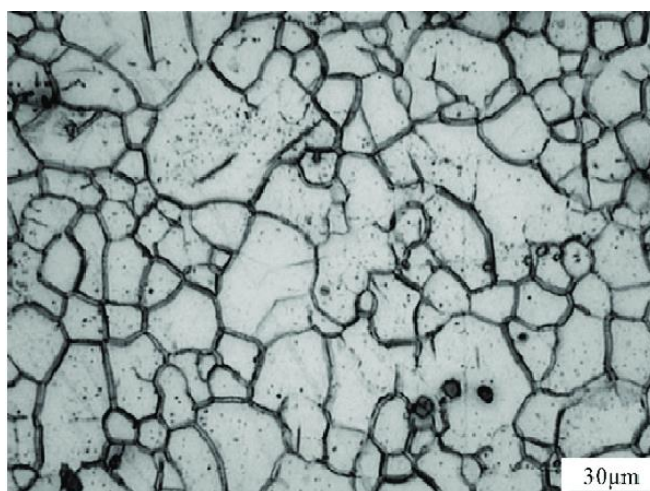


Рис. 2. Мікроструктура термомеханічно обробленого Mg-сплаву з дрібними зернами.

Вплив термомеханічної обробки. Автори підкреслюють, що термомеханічна обробка (гаряче прокатування, гаряче кування та екструзія) суттєво змінює мікроструктуру: зерна істотно дрібніють, зменшується неоднорідність розподілу фаз та дефекти лиття, що в цілому покращує механічні властивості (міцність, пластичність, стійкість до зносу).

Головні ефекти термомеханічної обробки: зниження середнього розміру

зерен – сприяє підвищенню міцності та пластичності (ефект «укріплення через дрібнозернистість»); гомогенізація структури – сприяє зниженню гальванічної корозії та більш рівномірному розчиненню в середовищі організму; зменшення дефектів лиття – покращує надійність механічних властивостей імплантатів.

Комбінація легуючих елементів і оптимальних термомеханічних режимів дозволяє контролювати не лише механічну міцність, але і швидкість корозії в біологічних середовищах. Наприклад, сплави з нижчим вмістом легуючих елементів після гарячої екструзії (Рис. 3) демонструють нижчий рівень корозії.

Високе введення рідкоземельних елементів може підвищувати корозійну стійкість, але ризикує утворенням великих вторинних фаз, які підсилюють гальванічну корозію.

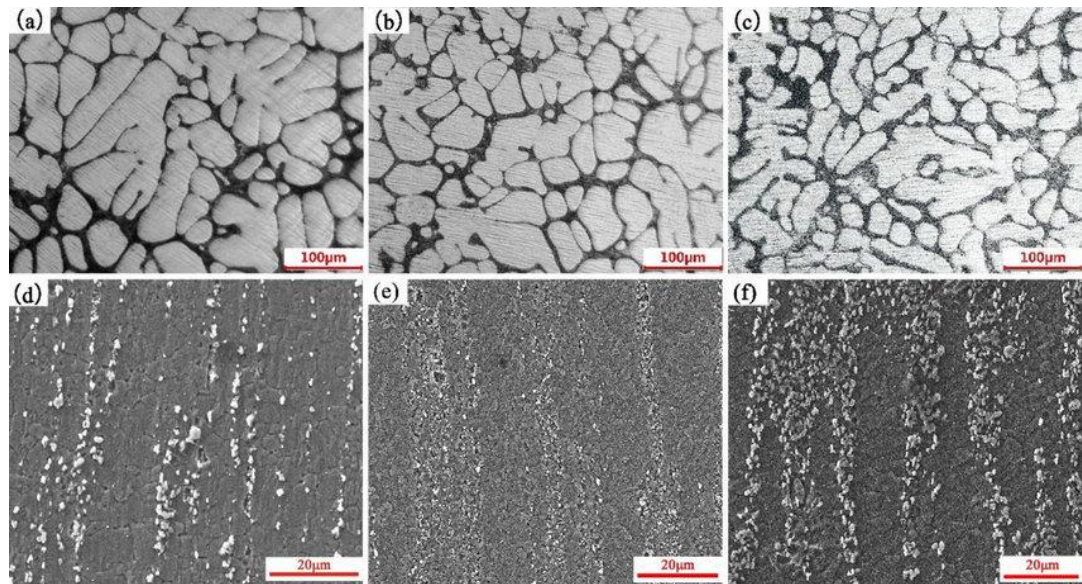


Рис. 3. Мікрофотографії візуалізації гарячої екструзії Mg-сплавів.

Такі підходи дозволяють відслідковувати закономірності зміни міцності, пластичності та текстури матеріалу під впливом різних режимів обробки, що є корисним для аналогічних досліджень алюмінію.

У роботі Sudip Kunda та ін. представлено комплексне експериментальне, теоретичне та чисельне дослідження термомеханічної поведінки

монокристалічної та полікристалічної міді під осьовим стисканням при різних швидкостях деформації. Основна увага приділена тому, як пластична деформація перетворює механічну роботу на теплову енергію, а також як це залежить від кристалічної структури та швидкості деформації (Рис. 4).

Автори побудували термодинамічно узгоджену модель термомеханіки для монокристалів металів з гранецентрованою кубічною граткою, зокрема для міді, де пластична робота розподіляється між накопиченою енергією, пов'язаною зі змінами дислокаційної структури, та тепловою енергією атомних коливань. У межах цієї моделі запропоновано нове представлення фактора Тейлора-Куїнні як функції ефективної температури, що дозволяє врахувати обмеження другої начала термодинаміки. Ця модель застосована для опису поведінки як монокристалічної, так і полікристалічної міді.

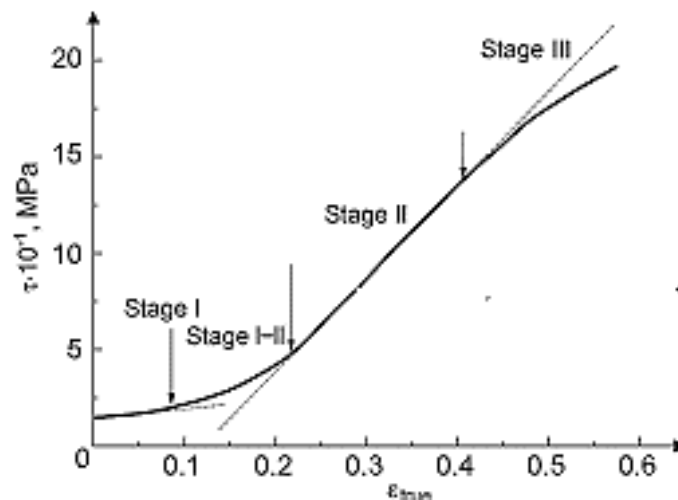


Рис. 4. Типові криві напруження-деформація для монокристалічної та полікристалічної міді під різними швидкостями деформації.

У частині експериментальних досліджень показано, що полікристалічні зразки міді при різних швидкостях деформації демонструють відмінну еволюцію температури на поверхні, яку вимірювали прикріпленими термопарами. Дослідження включали стискання зразків у широкому діапазоні швидкостей

пластичної деформації, що дозволило оцінити, як зміни деформаційної швидкості впливають на механічні та теплові характеристики матеріалу (Рис. 5).

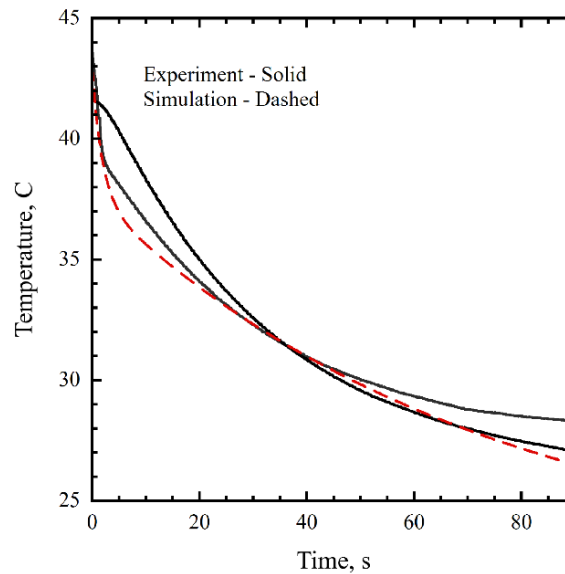


Рис. 5. Еволюція температури поверхні зразків під час термомеханічного навантаження.

У дослідженні Po-Jen Chen та Jui-Chao Kuo автори прагнули з'ясувати, як різні режими термомеханічної обробки – зокрема температура гарячої прокатки, швидкість деформації та ступінь редуції – впливають на те, яку мікроструктуру та текстуру формує алюмінієвий сплав AA1100 після рекристалізації. Для цього сплав піддали великій кількості експериментів із різними комбінаціями параметрів, а після прокатки зразки відпалювали та аналізували їхню кристалографічну орієнтацію за допомогою EBSD.

Результати показали, що навіть на стадії гарячої прокатки у матеріалі вже починають з'являтися рекристалізовані зерна, хоча їхня кількість невелика. Найсуттєвіші зміни відбувалися після відпалу: незалежно від конкретного режиму, головним компонентом текстури ставав так званий «Cube»-орієнтований стан. У зразках, оброблених за найбільш сприятливих умов (висока редуція та оптимальна комбінація температури й швидкості деформації), частка такої

текстури могла досягати приблизно половини всього об'єму матеріалу. Інші орієнтаційні компоненти – зокрема “Rotated Cube” та “Goss” – формувалися значно слабше й майже не впливали на загальну текстурну картину.

Дослідження чітко показало, що – фінальна текстура сплаву не є випадковою: нею можна керувати, змінюючи параметри гарячої прокатки (Рис. 6). Чим інтенсивніша деформація та чим краще підібраний температурно-деформаційний режим, тим виразніше формується “Cube” – текстура після рекристалізації. Це має важливе практичне значення, адже саме текстура значною мірою визначає механічні властивості листових алюмінієвих матеріалів – включно з міцністю, пластичністю та анізотропією.

У роботі [14] автори продемонстрували, що за допомогою контрольованих термомеханічних параметрів можна цілеспрямовано формувати потрібну мікроструктуру та текстуру сплаву AA1100, а отже – прогнозовано впливати на його експлуатаційні властивості.

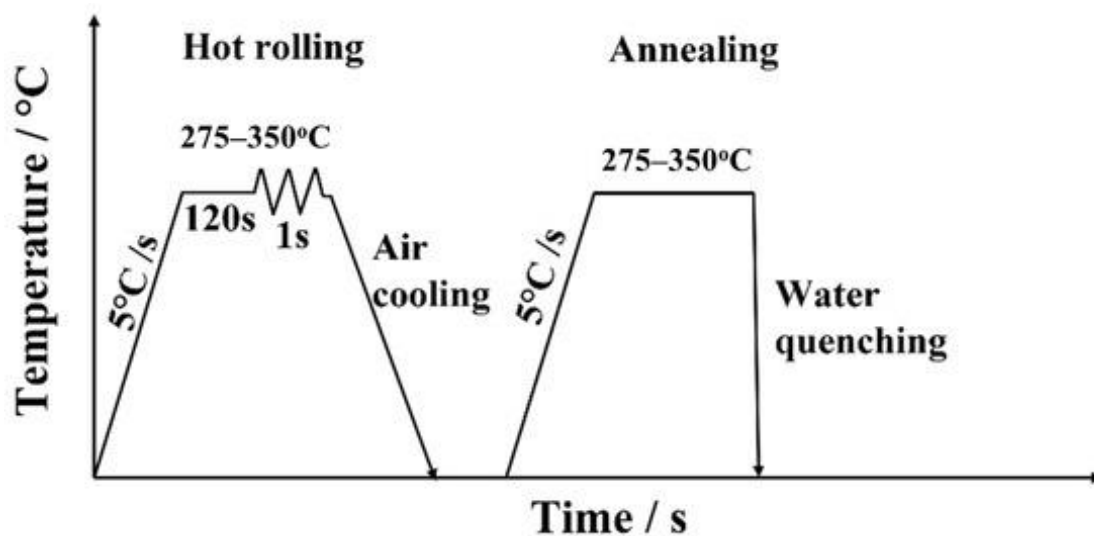


Рис. 6. Схема термомеханічних процесів, включаючи гарячу прокатку та відпал для експерименту з подвійним стисненням

У публікації Svirid A.E. та його співавторів показано, що високотемпературна термомеханічна обробка суттєво змінює мікроструктуру та

механічні властивості полікристалічних сплавів Cu–Al–Ni, легованих бором. Після такої обробки у сплавах формується дрібнозерниста структура, яка помітно підвищує їхню міцність і водночас забезпечує кращу пластичність порівняно з традиційно термообробленими або литими матеріалами. Це дрібне зерно сприяє більш рівномірному розподілу напружень під час деформації, завдяки чому матеріал краще витримує навантаження та демонструє стабільні механічні характеристики.

Автори встановили, що поведінка сплавів після такої обробки істотно залежить від їхнього хімічного складу, зокрема від вмісту алюмінію та бору. Різні концентрації легувальних елементів по-своєму впливають на фазовий склад, морфологію зерен і здатність сплаву до мартенситних перетворень. Це дозволяє цілеспрямовано підбирати склад для отримання потрібного поєднання міцності, пластичності й функціональних властивостей.

На основі отриманих результатів автори запропонували оптимізований режим високотемпературної термомеханічної обробки, придатний для об'ємних (bulk) заготовок сплаву. Така технологічна схема робить результати дослідження практично значущими, оскільки відкриває можливість промислового використання цих матеріалів у виробі, де потрібні підвищена довговічність, стабільність механічних параметрів і наявність ефектів, пов'язаних з мартенситною трансформацією, таких як пам'ять форми чи надпружність [15].

1.2. Основи термомеханічної обробки: сутність, види та закономірності процесів

Термомеханічна обробка є комплексним технологічним процесом, який передбачає поєднання пластичної деформації та термічного впливу на метал або сплав. Основна мета якої полягає у керованому змінненні мікроструктури матеріалу для досягнення бажаних механічних властивостей, таких як підвищена міцність, пластичність, ударна в'язкість та стійкість до втомного руйнування.

Сутність процесу полягає у використанні взаємодії механічної роботи та теплової енергії для стимуляції структурних перетворень, включаючи рекристалізацію, полігонізацію, розподіл дислокацій та зміну зеренної структури [2].

Термомеханічна обробка належить до складних технологічних процесів фізичного характеру, в основі яких лежить поєднання пластичної деформації металів із керованим тепловим впливом. Метою такого поєднання є цілеспрямована зміна мікроструктури матеріалу та формування заданого комплексу механічних властивостей. У процесі деформації в металі акумулюється значна частка внутрішньої енергії, що проявляється у вигляді дислокацій, дефектів кристалічної ґратки та залишкових напружень. Подальший або супутній температурний вплив активізує процеси відновлення структури, рекристалізації та росту зерен, у результаті чого формується структура, яка визначає експлуатаційні характеристики матеріалу.

Залежно від температурних умов проведення процесу розрізняють холодну, теплу та гарячу термомеханічну обробку. Холодна термомеханічна обробка здійснюється при температурах, нижчих за температуру рекристалізації, і характеризується інтенсивним наклепуванням, що супроводжується значним накопиченням дислокацій та зростанням міцнісних показників. Гаряча обробка, навпаки, проводиться при підвищених температурах, за яких відбувається активне відновлення кристалічної структури, зменшення внутрішніх напружень і укрупнення зерен. Тепла термомеханічна обробка займає проміжне положення між двома крайніми режимами та дозволяє досягти оптимального співвідношення між міцністю і пластичністю матеріалу.

Класифікація термомеханічної обробки також здійснюється за характером прикладеної деформації. До основних способів належать прокатка, кування, волочіння, пресування та екструзія. Окрему групу становлять методи інтенсивної пластичної деформації (SPD), зокрема рівноканальне кутове пресування (ECAP) і кручення під високим тиском (НРТ), які забезпечують формування

ультрадрібнозернистої структури. Кожен із зазначених методів створює специфічний тип зеренної будови та кристалографічної орієнтації, що безпосередньо впливає на механічні властивості металу.

Перебіг процесів термомеханічної обробки визначається комплексною дією температури, величини пластичної деформації та швидкості її прикладання. Зростання температури інтенсифікує рекристалізаційні явища та сприяє зміні розмірів зерен, тоді як підвищення ступеня деформації призводить до збільшення щільності дислокацій і накопичення енергії, необхідної для структурних перетворень. Швидкість деформації впливає на співвідношення між наклепом і відновлювальними процесами: при інтенсивних режимах переважає деформаційне зміцнення, а за повільнішої обробки зростає роль термічно активованих механізмів.

Важливу роль у формуванні властивостей матеріалу відіграє кристалографічна текстура, яка виникає під дією поєднання механічних напружень і температури. Зміна орієнтаційного розподілу зерен дозволяє керувати анізотропією механічних характеристик, підвищувати опір втомному руйнуванню та покращувати пластичні властивості.

1.3. Вплив термомеханічної обробки на формування зеренної структури та механічні властивості алюмінію

Термомеханічна обробка є одним із найефективніших методів керованого впливу на мікроструктуру алюмінію та його сплавів. Вона поєднує пластичну деформацію та термічний вплив, що дозволяє формувати зеренну структуру заданого розміру та морфології, а також оптимізувати механічні властивості матеріалу. Основний ефект термомеханічної обробки полягає у зміні розміру та форми зерен, кількості дислокацій, кристалографічної текстури та фазового складу, що безпосередньо впливає на міцність, пластичність і ударну в'язкість алюмінію [2].

У процесі холодної термомеханічної обробки зерна піддаються наклепу, який збільшує накопичення дислокацій і внутрішніх напружень. Це призводить до підвищення межі текучості та твердості алюмінію, але одночасно зменшує пластичність [3]. Гаряча термомеханічна обробка, навпаки, стимулює рекристалізацію, полігонізацію і дифузійне зрощування зерен, що сприяє відновленню пластичності та рівномірному розподілу внутрішніх напружень [4]. Важливою є і тепла обробка, яка поєднує ефекти холодної та гарячої обробки, забезпечуючи оптимальний баланс між міцністю та пластичністю [1].

Формування зеренної структури під впливом термомеханічної обробки підпорядковане закономірностям, які залежать від температури, ступеня деформації та швидкості обробки. Підвищення температури сприяє зростанню зерен та активує процеси рекристалізації, тоді як збільшення ступеня деформації веде до інтенсивного накопичення дислокацій і підвищення енергетичного потенціалу для структурних змін [11]. Швидкість деформації визначає співвідношення між наклепом і відновлювальними процесами: при високих швидкостях деформації домінує накопичення дефектів, при низьких – активується дифузійне відновлення структури [8].

Дослідження Po-Jen Chen та Jui-Chao Kuo (Metals, 2024) показали, що параметри ТМО (температура, ступінь деформації та швидкість) значно впливають на формування рекристалізаційної текстури в алюмінієвому сплаві AA1100, а відтак – на механічні властивості. Мікроструктура після термомеханічної обробки стає більш однорідною, дрібнозернистою, що підвищує межу текучості та ударну в'язкість [14].

Важливим є також вплив термомеханічної обробки на кристалографічну текстуру полікристалічного алюмінію. Орієнтація зерен змінюється під дією деформації та температури, що забезпечує анізотропію механічних властивостей і дозволяє керувати характеристиками міцності та пластичності [10]. Завдяки

цьому можливо досягти високих експлуатаційних характеристик матеріалу навіть при невеликому збільшенні розміру зерен.

Сучасні методичні підходи до дослідження термомеханічної обробки алюмінію включають комплекс експериментальних та чисельних методів, що дозволяє прогнозувати формування мікроструктури та властивості матеріалу [7]. Оптимізація режимів термомеханічної обробки дає змогу отримати дрібнозернистий алюміній з підвищеною міцністю і достатньою пластичністю, що є критично важливим для високотехнологічних сфер, включаючи авіаційну, автомобільну та машинобудівну промисловість.

Таким чином, термомеханічна обробка є ключовим інструментом керування структурою алюмінію та його сплавів, що дозволяє цілеспрямовано змінювати механічні властивості та забезпечувати необхідні експлуатаційні характеристики для різних видів промислового застосування.

Аналіз сучасної наукової літератури показує, що термомеханічна обробка є ключовим фактором формування зеренної структури та механічних властивостей алюмінію і його сплавів. У численних роботах дослідників розглядаються різні аспекти цього процесу, включно з впливом температури, ступеня деформації, швидкості обробки та комбінації термічних і механічних впливів на мікроструктуру матеріалу.

Po-Jen Chen і Jui-Chao Kuo демонструють, що параметри термомеханічної обробки визначають характер рекристалізаційної текстури та механічні властивості сплаву AA1100. Автори показали, що оптимальний вибір температури та ступеня деформації забезпечує дрібнозернисту структуру та підвищену межу текучості [14].

Zhao H., Cheng J., Zhao C. та ін. у своїй роботі на прикладі магнієвих сплавів розкривають закономірності зміни механічних властивостей під дією термомеханічної обробки. Попри те, що дослідження стосуються магнію,

методичні підходи до оцінки взаємозв'язку «температура – деформація – структура – властивості» є релевантними й для алюмінію [15].

Sudip Kunda та співавтори у статті досліджували одно- та полікристалічну мідь при різних швидкостях деформації. Вони показали, як темп деформації, накопичення дислокацій і теплоутворення впливають на механічні властивості металу. Цей підхід дозволяє застосовувати подібні методики для прогнозування властивостей полікристалічного алюмінію [16].

Svirid A.E. та ін. у роботі аналізували вплив високотемпературної термомеханічної обробки на структуру та механічні характеристики сплавів на основі Cu–Al–Ni. Висновки щодо взаємозв'язку температурного режиму та властивостей матеріалу є важливими для розробки режимів термомеханічної обробки алюмінію [15].

Panchenko E.Y. та співавтори у статті продемонстрували, що стабільність механічних властивостей полікристалічних сплавів пам'яті форми безпосередньо залежить від режимів термомеханічної обробки. Це дозволяє підкреслити важливість контролю параметрів обробки для алюмінієвих сплавів із заданими властивостями [17].

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

2.1. Підготовки зразків та дослідження зеренної структури

У даному дослідженні як об'єкт вивчення були використані двовимірні полікристалічні зразки алюмінію. Зразки виготовляли з алюмінієвої фольги чистотою 99,96% шляхом механічного вирізання. Розміри робочої частини зразків становили $100 \times 20 \times 0,15$ мм³.

Для отримання заданого середнього розміру зерен застосовували різні режими термомеханічної обробки. Регулювання зеренної структури здійснювалося шляхом варіювання параметрів відпалу та ступеня попередньої

пластичної деформації. Процес термомеханічної обробки включав декілька послідовних етапів.

На першому етапі зразки піддавали термічному відпалу з метою зняття внутрішніх напружень, що виникали в процесі виготовлення та вирізання з фольги. Відпал проводили в муфельній печі типу МП-2УМ при температурі 400°C протягом 2 годин. Після цього зразки охолоджували до кімнатної температури.

Другий етап полягав у попередній пластичній деформації зразків шляхом одноосьового розтягування на розривній машині. Ступінь деформації ε варіювали в межах від 1% до 10%. Після деформації зразки повторно піддавали термічному відпалу при температурах 300°C та 630 °C з витримкою 2 години. Контроль температури здійснювали за допомогою термопари типу хромель–алюмель.

Комбінація різних режимів деформації та відпалу дозволила отримати зразки з різним середнім розміром зерен. У результаті проведеної термомеханічної обробки було сформовано серію зразків із середнім розміром зерен у діапазоні від 1 до 55 мкм, що забезпечило можливість дослідження впливу зеренної структури на фізико-механічні властивості матеріалу.

Для виявлення зеренної структури використовували метод хімічного травлення, який забезпечує чітку візуалізацію меж зерен. Травлення проводили з використанням травителя Келлера, до складу якого входили: 30 мл HCl, 20 мл HNO₃, 5 мл HF та 30 мл дистильованої води. Зразки занурювали в травильний розчин на 30 секунд. Час травлення був підібраний експериментально з метою отримання оптимального контрасту зеренної структури.

Після завершення травлення зразки промивали дистильованою водою для видалення залишків реагентів і висушували потоком повітря. Металографічні зображення окремих зразків після травлення наведені на рис. 7. Отримані

зображення демонструють чітко окреслені межі зерен, що дозволяє виконати детальний аналіз мікроструктури.

Відомо, що розмір зерен істотно впливає на механічні властивості матеріалу, зокрема на міцність, твердість і пластичність. У зв'язку з цим дослідження зеренної структури є важливим етапом аналізу структурного стану матеріалу після термомеханічної обробки.

Для підвищення достовірності результатів середній розмір зерен визначали двома незалежними методами: методом випадкових січних та методом підрахунку кількості зерен на одиницю площі поверхні зразка.

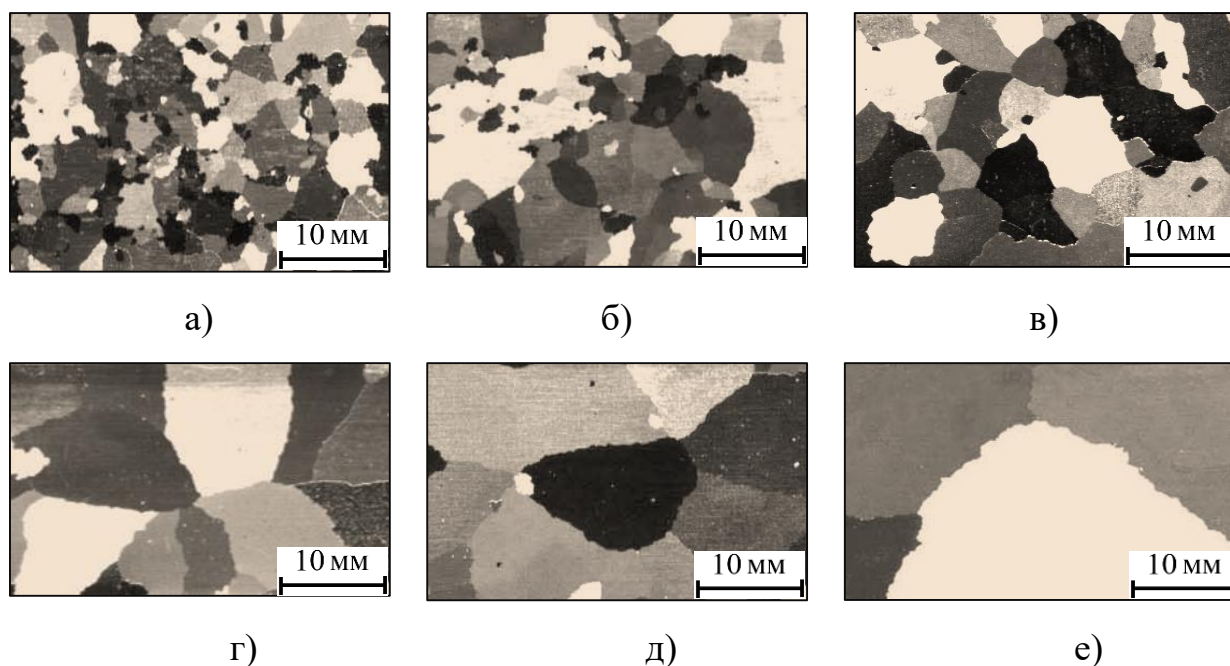


Рис. 7. Металографічні зображення двовимірних полікристалів алюмінію з середнім розміром зерен: а) 3 мм; б) 5 мм; в) 8 мм; г) 13 мм; д) 18 мм; е) 31 мм.

Метод випадкових січних полягає у нанесенні на металографічне зображення випадково орієнтованих ліній та підрахунку кількості перетинів цих ліній з межами зерен. На основі отриманих даних визначали середню кількість перетинів на одиницю довжини січної, що дозволяло розрахувати середній

умовний діаметр зерен. Даний метод забезпечує високу статистичну достовірність результатів.

Метод підрахунку кількості зерен на одиницю площі ґрунтується на визначенні числа зерен, що містяться в заданій площі металографічного зображення. З цією метою на отримані зображення накладали сітку з відомими геометричними параметрами та виконували підрахунок кількості зерен у кожному елементі сітки. На основі одержаних даних визначали середню кількість зерен на одиницю площі та розраховували середній умовний діаметр зерен. Застосування даного методу також дає змогу оцінити ступінь неоднорідності зеренної структури досліджуваних зразків.

Комплексне застосування обох методів забезпечило надійну та достовірну оцінку середнього розміру зерен і структурного стану зразків алюмінію після проведеної термомеханічної обробки.

2.2. Механічні випробування зразків.

Механічні випробування двовимірних полікристалічних зразків алюмінію проводили методом одноосьового розтягування в режимі активного навантаження з доведенням зразків до повного руйнування. Експерименти виконували в повітряному середовищі за кімнатної температури при сталій швидкості переміщення захватів, яка становила 0,4 мм/хв.

Деформування зразків здійснювали з використанням розривної машини, принципову схему якої наведено на рис. 8. Обрана методика випробувань забезпечувала відтворювані умови навантаження та дозволяла отримувати достовірні деформаційні та міцнісні характеристики досліджуваних двовимірних полікристалічних зразків алюмінію.

З метою дослідження процесів виникаючих на поверхні зразків застосовували методику *in situ* спостереження структурних змін безпосередньо в процесі їх пластичної деформації. Зазначена методика ґрунтується на аналізі

розсіювання білого світла поверхнею зразків, які попередньо піддавали хімічному травленню з метою формування рельєфу, чутливого до змін мікроструктури.

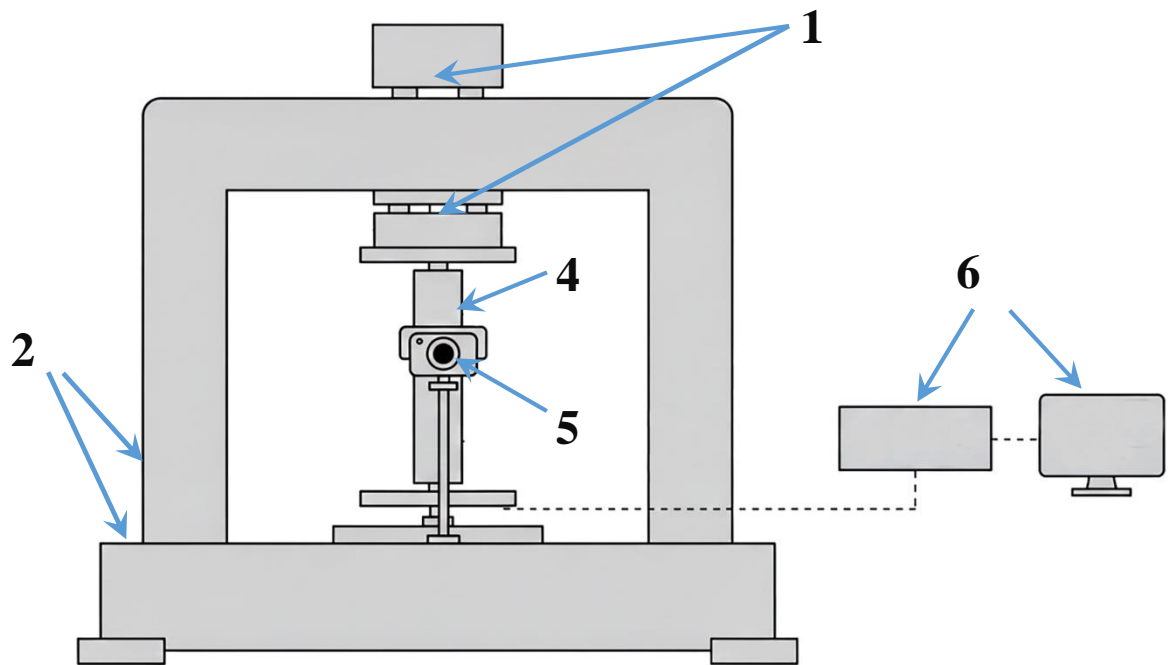


Рис. 8. Схема експериментальної установки для дослідження виникнення орієнтаційних змін та розвитку тріщин у процесі пластичної деформації зразка: 1 – елементи механізму навантаження; 2 – опорні елементи та нижня опорна платформа; 3 – досліджуваний зразок; 4 – WEB-камера; 5 – комплекс обробки та реєстрації орієнтаційних змін та деформаційної кривої.

У процесі навантаження зміни характеру розсіювання світла від поверхні зразка відображали перебудову зеренної структури, локалізацію пластичної деформації, а також зародження та подальший розвиток мікро- і макротріщин. Це забезпечувало можливість візуального контролю еволюції дефектів у реальному часі та встановлення взаємозв'язку між структурними змінами на поверхні матеріалу і механічним станом зразка під час деформування.

Унаслідок хімічного травлення на поверхні зразків формується зеренний рельєф, який спричиняє розсіювання білого світла та забезпечує виникнення характерного контрасту, що відповідає окремим зернам. Зображення поверхні реєстрували за допомогою WEB-камери, встановленої на спеціальному оптичному столику перед зразком (рис. 8). Для забезпечення необхідного збільшення та чіткості зображення між камерою та зразком використовували систему оптичних лінз. Отримане зображення в режимі реального часу передавалося до персонального комп'ютера.

Для забезпечення можливості безперервної реєстрації еволюції поверхневої мікроструктури зразків (рис. 9, позначення 1) під час дії механічного навантаження була використана спеціалізована оптична система, що включала елементи освітлення та цифрової відеофіксації.

Схема конфігурації освітлення експериментального зразка представлена на рис. 9. Освітлення здійснювалося комбінацією двох незалежних джерел білого світла, що дозволило досягти оптимального контрасту для якісної візуалізації меж зерен двовимірних полікристалічних зразків.

Перше джерело низьковольтне (рис. 9, позначення 3). Використовувалася лампа розжарювання з номінальною потужністю 170 Вт при напрузі 17 В. Це джерело було розташоване на фіксованій відстані 20 см від робочої зони досліджуваного зразка.

Друге джерело люмінесцентне (рис. 9, позначення 4). Як додаткове джерело використовувалася люмінесцентна лампа типу ЛД20-2, яка встановлювалася на значно більшій відстані 200 см.

Така конфігурація забезпечувала стабільність світлового потоку та необхідний рівень дифузного освітлення для мінімізації бліків.

Для безпосередньої реєстрації поверхневої мікроструктури застосовувалася високоякісна WEB-камера Logitech C920 (рис. 9, позначення 2).

Камера забезпечувала просторову роздільну здатність 150 точок на дюйм і була підключена до персонального комп'ютера.

Отримані відеодані підлягали покадровій цифровій обробці з використанням спеціалізованого програмного забезпечення VirtualDub. Цей етап обробки дозволив провести аналіз кінетики еволюції структурних змін, які виникають у процесі пластичної деформації.

Для точної фіксації макроскопічної механічної реакції матеріалу застосовувалася автоматизована система реєстрації.

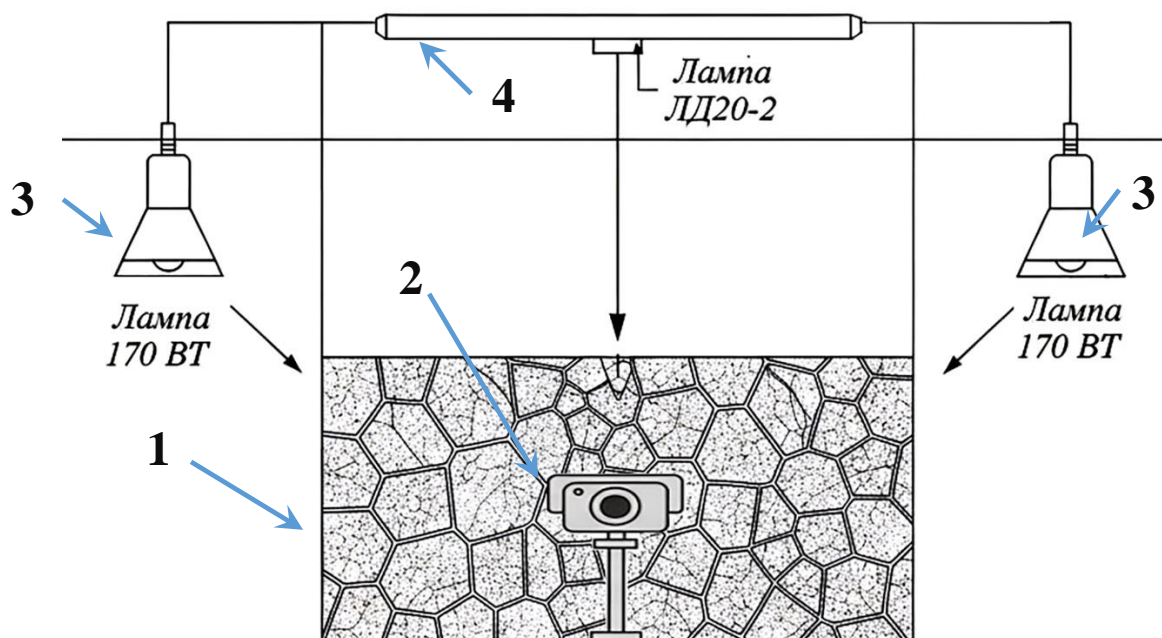


Рис. 9. Схема проведення експерименту з використанням білого світла. (1 – зразок, 2 – Web-камера, 3 – лампи накаливання, 4 – люмінесцентна лампа).

Реєстрація деформаційних кривих здійснювалася в автоматичному режимі за допомогою цифрового мультиметра UT70D. Підключення мультиметра до персонального комп'ютера здійснювалося через інфрачервоний порт, що забезпечувало безперервний збір даних. Заявлена точність вимірювання деформуючого напруження становила 0.01 г/мм^2 .

Ключовою особливістю даної методики є синхронна реєстрація двох типів даних. Послідовності зображень поверхні зразка (мікроструктурні зміни) з відповідною діаграмою «напруження-деформація» (макроскопічна реакція).

Забезпечення такої синхронності є обов'язковою умовою для проведення комплексного кореляційного аналізу механічної поведінки двовимірних полікристалічних зразків алюмінію, дозволяючи встановити взаємозв'язок між локалізацією пластичної деформації та загальною кривою навантаження.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1. Особливості експериментальних досліджень процесу деформування двовимірних полікристалів

Особливої уваги потребує вплив параметрів зеренної структури, оскільки реальні полікристалічні матеріали характеризуються значною неоднорідністю зерен за формою, розмірами та кристалографічною орієнтацією відносно прикладеного зовнішнього напруження. У цьому контексті значний науковий інтерес становить дослідження механізмів зародження та еволюції структурних змін, що оптично спостерігаються безпосередньо під час пластичної деформації полікристалів із різною зернистою структурою.

Результати попередніх експериментальних досліджень свідчать, що найбільш зручними модельними об'єктами для такого аналізу є двовірні полікристали, тобто зразки, які є однокристалічними за товщиною та характеризуються різним середнім розміром зерен. Завдяки однокристалічності за товщиною всі процеси, пов'язані із зародженням і розвитком деформаційних та структурних перетворень, можуть бути безпосередньо зафіксовані на поверхні зразка. Це істотно спрощує інтерпретацію експериментальних даних, оскільки

спостережувані поверхневі макроскопічні структурні зміни одночасно відображають процеси, що відбуваються в об'ємі матеріалу.

Експериментальні дані також свідчать, що принципові якісні зміни в характері пластичної деформації виникають переважно під час переходу від двовимірних до одновимірних полікристалічних систем. У зв'язку з цим закономірності та механізми пластичної деформації, встановлені для двовимірних полікристалів, можуть бути екстрапольовані для пояснення фізичної природи деформаційних процесів у тривимірних полікристалах. Окрім того, двовимірні полікристалічні матеріали мають самостійне прикладне значення, зокрема у вигляді полікристалічних плівок і фольг, що експлуатуються в умовах дії механічних напружень. Сукупність наведених чинників зумовила вибір двовимірних полікристалів алюмінію як об'єктів даного дослідження.

3.2. Вплив зеренної структури на характер деформування двовимірних полікристалів алюмінію

Під час виконання цієї наукової праці було отримано зразки двовимірних полікристалів алюмінію з диференційованими параметрами зернистості в діапазоні від 1 мм до 55 мм за допомогою різних режимів термомеханічної обробки. Деформування зразків проводилося на експериментальній установці для аналізу процесів пластичної деформації. Відповідно, моніторинг особливостей зародження та подальшої еволюції деформаційних і структурних змін здійснювався безпосередньо під час навантаження двовимірних полікристалів алюмінію з варійованими параметрами зернистості. Основні результати дослідження подано на рис. 11.

На рисунках 11(а, б, в) наведено результати дослідження деформування та доведення до руйнування зразків двовимірних полікристалів алюмінію в залежності від середнього розміру зерен безпосередньо в процесі пластичної деформації.

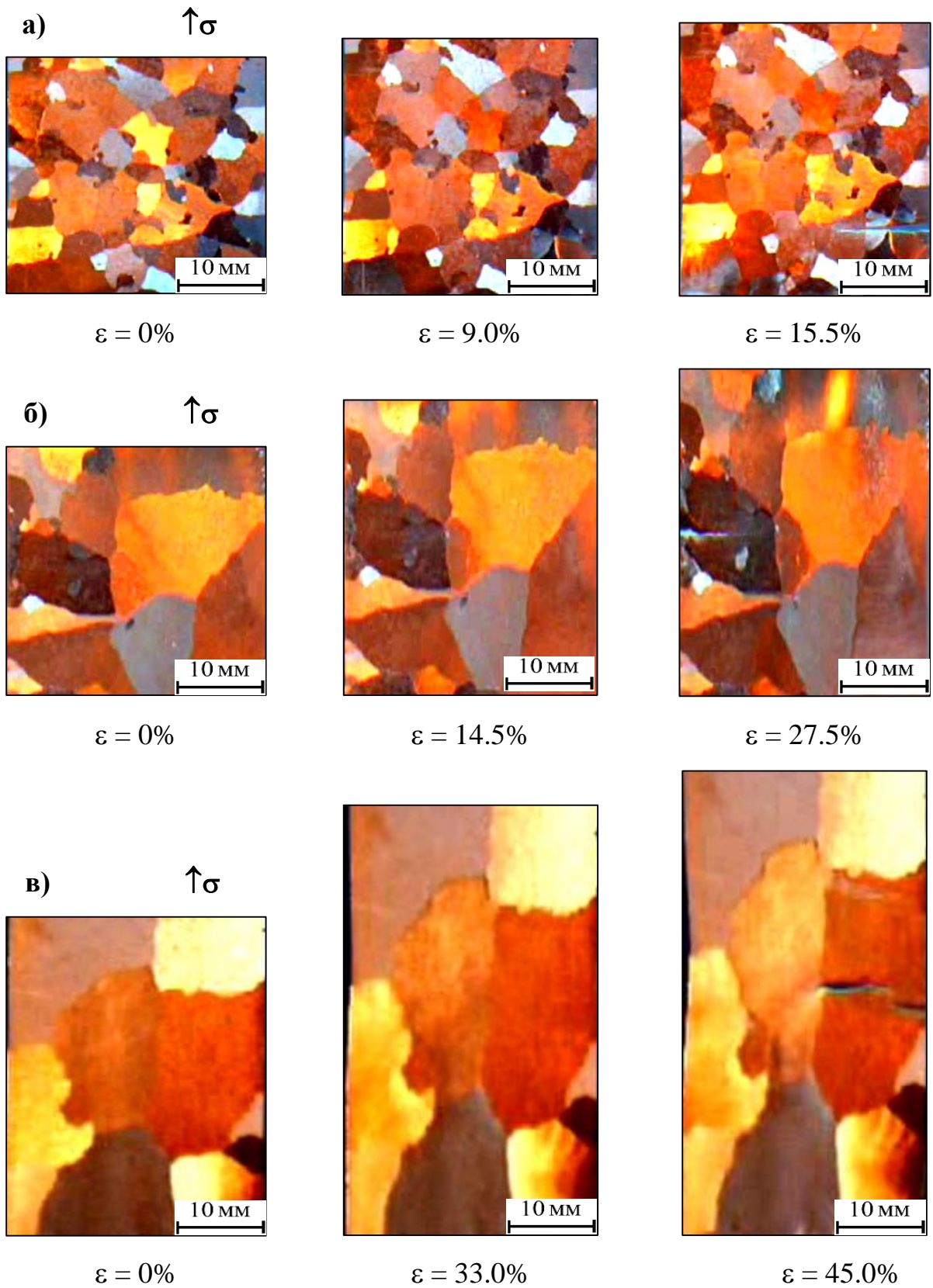


Рис. 11. Фотографії полікристалічних зразків алюмінію з початку деформування до руйнування зразків. (Стрілкою показано напрямок діючого напруження).

У крупнокристалічних зразках (рис. 11, в) ($\bar{d} > 30$ мм) максимальна деформація до руйнування досягає 45%, а у зразках із середнім розміром зерен (рис. 11, б) $\bar{d} = 15$ мм може досягати 35%. Встановлено, що значення межі пластичності досягає максимальних величин для крупнокристалічних зразків, у робочій частині яких наявна обмежена кількість зерен (рис. 11, б).

Отримані значення ε_{\max} безпосередньо визначаються механізмами пластичної деформації матеріалу, зокрема особливостями розвитку локалізованих деформацій у процесі навантаження. Виявлена закономірність свідчить про вирішальну роль зеренної структури у формуванні деформаційної здатності та граничних механічних характеристик полікристалічних зразків.

На рис. 12 наведені деформаційні криві для досліджених зразків із різним розміром зерна. За своїм характером (видом) деформаційні криві, які отримані для зразків із різним розміром зерна, практично не відрізняються і мають стандартний параболічний вид, однак чітко виявляється залежність основних механічних характеристик від середнього розміру зерна.

Залежності напруження σ від відносної деформації ε для трьох зразків, що відрізняються структурними параметрами. Усі криві мають характерний для металів вигляд і включають початкову ділянку інтенсивного зростання напруження, перехід до пластичної течії та подальший етап розвитку пластичної деформації. Максимальна величина межі пластичності ε_{\max} спостерігається у крупнокристалічних зразках, які містять у робочій частині кілька меж зерен (рис. 12, крива 3). Експериментально показано, що значення ε_{\max} визначається характером руйнування зразка.

На рис. 12, крива 1 характеризується найбільшим нахилом у початковій області деформації, що вказує на підвищений ефективний модуль пружності та високий опір початку пластичної деформації. Перехід у пластичний стан відбувається за відносно великих значень напруження, після чого спостерігається інтенсивне деформаційне зміцнення. Максимальні значення напруження

досягаються при порівняно невеликих деформаціях, що свідчить про обмежену деформаційну здатність матеріалу за одночасно високих міцнісних характеристик.

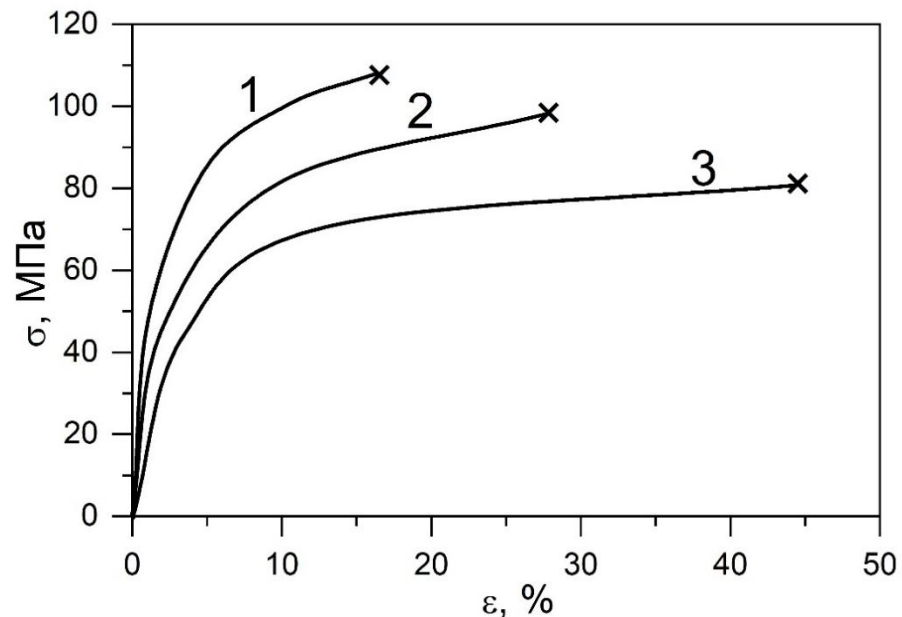


Рис. 12. Діаграми напруження–деформація (σ – ϵ) двовимірних полікристалів алюмінію з різним середнім розміром зерен: 1 – дрібнозернистий зразок; 2 – середньозернистий зразок; 3 – крупнозернистий зразок.

Рис. 12, крива 2 займає проміжне положення між кривими 1 і 3. Для неї характерні менші значення напружень на початковій і середній стадіях деформації, ніж для кривої 1, однак ширший інтервал стабільної пластичної течії. Швидкість деформаційного зміцнення є помірною, що забезпечує поєднання достатньо високої міцності з підвищеною пластичністю. Такий характер кривої свідчить про більш рівномірний розподіл деформації в об'ємі зразка.

Крива 3 відповідає зразку з мінімальним опором пластичній деформації. Початковий нахил кривої є найменшим, а перехід у пластичний стан відбувається за нижчих значень напруження. Подальше зростання σ з ϵ є пологим, що вказує

на слабо виражене деформаційне зміцнення. Водночас досягаються найбільші значення граничної деформації, що характеризує матеріал як такий, що має високу деформаційну здатність.

При переході від кривої 1 до кривої 3 спостерігається систематичне зменшення рівня напружень у всьому діапазоні деформацій та одночасне розширення області пластичної течії. Це вказує на визначальний вплив структурних характеристик матеріалу на співвідношення між його міцнісними та деформаційними властивостями.

ВИСНОВКИ

1. Досліджено *in situ* характер виникнення та розвитку тріщин при пластичній деформації двовимірних полікристалів алюмінію з різним середнім розміром зерен.

2. Показано, що в крупнокристалічних зразках алюмінію ($\bar{d} \approx 25\text{-}35$ мм) руйнування носить транскристалітний характер. У таких зразках досягається максимальна деформація до зруйнування.

3. Встановлено, що для крупнокристалічних зразків алюмінію із середнім розміром зерен понад 35 мм максимальна деформація до руйнування досягає приблизно 45%, тоді як для зразків із середнім розміром зерен ($\bar{d} \approx 10\text{-}55$ мм) у діапазоні її значення зменшується до близько 35 %. Для дрібнозернистих зразків із середнім розміром зерен ($\bar{d} \approx 2\text{-}5$ мм) мм гранична деформація до руйнування становить до 15 %.

4. Показано, що максимальна деформація до моменту руйнування у досліджених двовимірних полікристалах алюмінію монотонно зростає зі збільшенням середнього розміру зерен, що свідчить про визначальний вплив зеренної структури на деформаційну здатність і механічну поведінку матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Давиденко М.О. Методи термомеханічної обробки у виробництві легких сплавів. – Львів: ЛНУ, 2019. – 198 с.
2. Лещенко І.О. Металознавство легких сплавів. – Дніпро: ДНУ, 2019. – 223 с.
3. Kunda Sudip et al. Study of the Thermomechanical Behavior of Single-Crystal and Polycrystal Copper. 2024. – С. 55–72.
4. Totten G.E. MacKenzie D.S. Handbook of Aluminum: Volume 1: Physical Metallurgy and Processes. CRC Press, 2003. – 842 с.
5. Бабенко С.І. Коваль В.П. Фізико-хімічні властивості алюмінію та його сплавів. – Харків: ХНУ, 2020. – 256 с.
6. Li L. et al. Effect of Thermomechanical Processing on Microstructure and Mechanical Properties of AA2024 Aluminum Alloy. Materials Science and Engineering, 2021. – С. 122–135.
7. Гнатюк С.М. Фізико-хімічні та механічні властивості легких металів. – Львів: ЛНУ, 2018. – 243 с.
8. Svirid A.E. et al. The Effect of High-Temperature Thermomechanical Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Cu–Al–Ni–(B) Alloys with a Thermoelastic Martensitic Transformation. Physics of Metals and Metallography, 2023. – С. 85–101.
9. Петров А.І. Ковальчук О.В. Технологія легких металів: підручник. – Харків: Право, 2020. – 288 с.
10. Polmear I.J. Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals. 5th Edition. Butterworth-Heinemann, 2017. – 456 с.
11. Андрусак О.В. Металознавство та термомеханічна обробка металів: підручник. – Київ: Видавничий дім "Київський університет", 2018. – 412 с.
12. Panchenko E.Y. et al. Cyclic Stability of Two-Way Shape Memory Effect in Aged Ni_{50.3}Ti_{32.2}Hf_{17.5} Polycrystals after Various Thermomechanical Treatments. 2023. – С. 1234–1248.

13. Філіпченко О.В. Мартиненко С.Ю. Полікристалічні структури металів і сплавів. – Київ: КНУ, 2017. – 204 с.
14. Коваль В.П. Гончаренко С.І. Механічні властивості алюмінію та сплавів. – Київ: Наукова думка, 2022. – 267 с.
15. Chen Po-Jen Kuo Jui-Chao. On the Relationship between Thermomechanical Processing Parameters and Recrystallization Texture in AA1100 Aluminum Alloy. «Metals», 2024. – С. 101–115.
16. Zhao H. Cheng J. Zhao C. et al. The Recent Developments of Thermomechanical Processing for Biomedical Mg Alloys and Their Clinical Applications. 2025. – С. 1–26.
17. Ляшенко В.П. Сидоренко І.М. Термічна та термомеханічна обробка алюмінієвих сплавів. – Київ: Наукова думка, 2021. – 310 с.