

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 _____
« ____ » червня 2024 р.

Оцінка « ____ »
Голова ДЕК _____
« ____ » червня 2024 р.

Дар'я Савуцька

**Вплив термомеханічної обробки на механічні властивості
полікристалів**

Дипломна робота на здобуття
освітнього ступеня
«Бакалавр» за спеціальністю
104 – «фізика та астрономія»
освітньо-професійна програма –
«фізика»

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

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

Харків 2024

АНОТАЦІЯ

Дар'я Савуцька

Вплив термомеханічної обробки на механічні властивості полікристалів
– Рукопис.

Дипломна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» за спеціальністю 104 – «фізика та астрономія» » освітньо-професійна програма – «фізика» – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, 2024 - 29 с., – 16 рис.

У дипломній роботі досліджено вплив термомеханічної обробки на механічні властивості полікристалічних матеріалів. Зокрема, було проаналізовано зміни міцності, пластичності та твердості полікристалів після проведення різних режимів термомеханічної обробки, включаючи нагрівання, охолодження та механічне деформування. Експериментальні результати показали, що термомеханічна обробка може суттєво змінювати структуру матеріалу, впливаючи на розмір і форму зерен, а також на наявність і розподіл внутрішніх дефектів. Ці зміни, у свою чергу, впливають на механічні властивості матеріалів, підвищуючи їхню міцність і зносостійкість. Робота також розглядає механізми, що лежать в основі змін у структурі та властивостях матеріалів під впливом термомеханічної обробки. Отримані результати мають важливе значення для розробки нових технологій обробки матеріалів з покращеними експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: термомеханічна обробка, двовимірні полікристали алюмінію, механічні властивості, структура матеріалу, міцність, пластичність, середній розмір зерен.

ANNOTATION

Daria Savutska

The influence of thermomechanical treatment on the mechanical properties of polycrystals - Manuscript.

Degree work on obtaining educational qualification level “Bachelor” in the specialty 104 - “Physics and Astronomy” educational and professional program - “Physics” – V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkov, 2024, 29 p, – 16 ris.

In the thesis, the influence of thermomechanical treatment on the mechanical properties of polycrystalline materials is investigated. Specifically, changes in strength, plasticity, and hardness of polycrystals after various modes of thermomechanical treatment, including heating, cooling, and mechanical deformation, were analyzed. Experimental results showed that thermomechanical treatment can significantly alter the material's structure, affecting the grain size and shape, as well as the presence and distribution of internal defects. These changes, in turn, impact the mechanical properties of the materials, enhancing their strength and wear resistance. The work also examines the mechanisms underlying the changes in the structure and properties of materials under the influence of thermomechanical treatment. The obtained results are important for the development of new material processing technologies with improved performance characteristics.

Keywords: thermomechanical treatment, two-dimensional aluminum polycrystals, mechanical properties, material structure, strength, plasticity, average grain size.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	6
1.1 Класифікація видів термічної обробки металів та сплавів	6
1.2. Структурні зміни при пластичній деформації кристалічних матеріалів	13
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	19
2.1. Виготовлення зразків	19
2.2. Механічні випробування зразків	21
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ЇХ РЕЗУЛЬТАТІВ	24
3.1. Особливості досліджень деформування двовимірних полікристалів	24
3.2. Вплив зеренної структури на характер деформування і границю пластичності двовимірних полікристалів алюмінію	25
ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	29

ВСТУП

Термомеханічна обробка є одним із ключових методів зміни властивостей матеріалів, особливо металевих сплавів та полікристалічних матеріалів. Полікристали, які складаються з великої кількості дрібних кристалітів або зерен, виявляють особливі механічні властивості, що залежать від їхньої внутрішньої структури, розмірів зерен, та наявності дефектів. Термомеханічна обробка дозволяє цілеспрямовано впливати на ці характеристики, змінюючи таким чином поведінку матеріалу при механічних навантаженнях.

В останні десятиліття дослідження у галузі матеріалознавства значною мірою зосереджені на вдосконаленні методів термомеханічної обробки для досягнення оптимальних властивостей матеріалів. Одним з найбільш важливих аспектів є підвищення міцності, пластичності та втомної витривалості полікристалів. Застосування термомеханічної обробки дозволяє не тільки покращити ці властивості, але й забезпечити стабільність матеріалів в умовах експлуатації, що є критично важливим для сучасних інженерних та промислових застосувань.

Вивчення впливу термомеханічної обробки на полікристалічні матеріали також включає аналіз мікроструктурних змін, які відбуваються в процесі обробки. Знання про те, як змінюється структура зерен, які дефекти з'являються або зникають, дозволяє краще зрозуміти механізми, що визначають кінцеві властивості матеріалів. Це, у свою чергу, сприяє розробці нових методів обробки та створенню матеріалів з наперед заданими характеристиками.

Метою даної дипломної роботи є дослідження впливу різних режимів термомеханічної обробки на механічні властивості полікристалів. Зокрема, буде розглянуто зміни у структурі зерен, їхній розмір та розподіл, а також механічні властивості, такі як твердість, міцність та пластичність. В результаті цього дослідження планується отримати нові дані, які допоможуть у розробці ефективніших методів термомеханічної обробки для покращення експлуатаційних характеристик полікристалічних матеріалів.

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1. Класифікація видів термічної обробки металів та сплавів

Термічна обробка поділяється на:

- *Власне термічну*
- *Хіміко-термічну*
- *Термомеханічну (деформаційно-термічну)*

Власне термічна обробка полягає в термічному впливі на метали або сплави, хіміко-термічні ефекти - в поєднанні теплового і хімічного впливу, термомеханічні ефекти - в поєднанні теплового впливу і пластичної деформації.

Власне термічна обробка містить такі основні види відпалу: відпал 1-го роду, відпал 2-го роду, загартування з поліморфним перетворенням, загартування без поліморфного перетворення і загартування з плавленням поверхні, відпуск, старіння. Ці види термічної обробки відносяться і до сталей, і до кольорових металів і сплавів. [1]

Відпал

Відпал 1-го роду частково чи повністю усуває відхилення від рівноважного стану, що виникли при попередній обробці (при литті, обробці тиском, зварюванні тощо). Процеси, що усувають відхилення від рівноважного стану, йдуть мимовільно, і нагрівання при отжиге 1-го роду проводять лише прискорення цих процесів. Основні параметри відпалу 1-го роду – температура нагріву та час витримки, швидкості нагріву та охолодження мають підлегле значення.

Розрізняють такі різновиди відпалу 1-го роду:

- Гомогенізаційний;
- Рекристалізаційний;
- зменшуючий напруги відпал.

Гомогенізація

Гомогенізаційний відпал - це термічна обробка, під час якої усуваються повністю або частково наслідки нерівноважної кристалізації - концентраційні неоднорідності різного походження (наприклад, внутрішньокристалітну ліквідацію, дендритну структуру, вирівнювання концентрації усередині зерен твердого розчину тощо). В основі цих процесів лежить дифузія, тому гомогенізаційний відпал називають також дифузійним. Температура такого відпалу має бути досить високою, щоб забезпечувати інтенсивний розвиток дифузійних процесів і водночас не відбувався ріст зерен у результаті збірної рекристалізації. Як правило, вона не перевищує $0,8 T_{пл}$. [2]

Рекристалізаційний відпал

Клепану сталь відпалюють при температурі вище початку рекристалізації для усунення заклепок і отримання певного розміру зерна.

Призначений для холоднопресованих твердих заготовок, що не піддаються деформації. Даний метод призначений для усунення наклепу і використовується для: труб; Цей спосіб відпалу використовують для деформування сплавів як кінцеву або проміжну операцію. Під час цього процесу продукт нагрівають до температури на $100 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище температури рекристалізації, витримують і охолоджують. На виході металург отримує сплав із абсолютно новими, часто рівновісними зернами. Рекристалізаційна термічна обробка сталі відновлює пластичність металу.

Метали, які були пластично деформовані, можуть пройти процес рекристалізації лише після того, як їх деформація перевищить певний мінімум, який називається критичним ступенем деформації.

$$\varepsilon = \frac{H_0 - h}{H_0} 100\%$$

Якщо ступінь деформації менший за цей критичний рівень, то при нагріванні нові зерна не утворюються. Критичний рівень деформації є невеликим (від 2% до 8%); для алюмінію він близький до 2%, для заліза і міді - до 5%.

Також існує температурний поріг рекристалізації – це найнижча температура нагріву, необхідна для утворення нових зерен. Температурний поріг рекристалізації становить певний відсоток від температури плавлення металу:

$$T_{\text{РЕКР}} = a \cdot T_{\text{ПЛ}}$$

Значення коефіцієнта залежить від чистоти металу й ступеня пластичної деформації. Для металів технічної чистоти $a = 0,3 - 0,4$ й зменшується зі збільшенням ступеня деформації. Зниження кількості домішок може знизити його до $0,1 - 0,2$. Для твердих розчинів $a = 0,5 - 0,6$, а при розчиненні тугоплавких металів може сягати $0,7 - 0,8$.

Рекристалізація полягає у формуванні нових кристалічних зерен та їх послідовному збільшенні. Утворення нових зерен під час рекристалізації відбувається в областях з найвищою густиною дислокацій, зазвичай на межах деформованих зерен. Чим більше пластичної деформації, тим більше виникає центрів рекристалізації.

З часом ці центри нових зерен збільшуються в розмірі за рахунок переходу атомів від деформованого оточення до більш досконалої решітки.

Ця стадія рекристалізації відома як первинна рекристалізація або рекристалізація обробки. Первинна рекристалізація завершується при повному поглинанні нових зерен старими деформованими зернами.

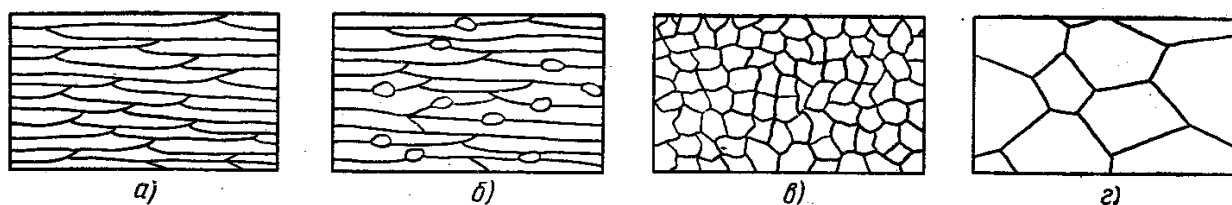


Рис. 1. Схема зміни мікроструктури наклепанного металу при нагріванні: а) наклепаний метал; б) початок первинної рекристалізації; в) кінець первинної рекристалізації; г) збірна рекристалізація. [3]

Після завершення первинної рекристалізації настає зростання утворених зерен; ця стадія відома як збірна рекристалізація. Збірна рекристалізація не пов'язана з попередньою пластичною деформацією металу. Цей процес непевно виникає при високих температурах, оскільки укрупнення зерен призводить до зменшення вільної енергії металу через зменшення поверхневої енергії (чим більше кристали, тим менше загальна довжина границь).

Відпал зменшуючий напругу

Відпал, що зменшує напругу – це термічне оброблення, під час якого головним процесом є повна або часткова релаксація внутрішніх залишкових напружень, що виникають під час різних технологічних операцій (наприклад, прокатування, зварювання тощо).

Цей метод термічної обробки використовується для зварних виробів, виливок, заготовок після обробки різанням тощо. Всі згадані вироби можуть мати залишкові напруження через нерівномірну пластичну деформацію та охолодження. Для зняття внутрішнього напруження сталі застосовують відпал при температурі 160-700°C, після чого виріб повільно охолоджують. Різні вироби обробляються при різних температурах, вибір яких залежить від марки сталі та методу обробки заготовки. Цей метод термічної обробки дозволяє частково або повністю розслабити залишкові напруження. [4]

Вплив деформації

Деформація — це зміна форми та розмірів предмета під дією зовнішніх сил. Залежно від джерела сил розрізняють два їх види: зовнішні та внутрішні. Зовнішні сили включають навантаження, що прикладається до об'єкта ззовні, тоді як внутрішні сили виникають через структурні зміни та температурні градієнти всередині матеріалу.

Деформація може бути пружною або пластичною. Пружна деформація характеризується тим, що форма та розміри предмета повністю відновлюються після зняття навантаження. Пластична деформація, навпаки, є необоротною: після зняття навантаження предмет зберігає нову форму і розміри.

Одними з найважливіших властивостей металевих матеріалів є міцність, твердість і пластичність. Міцність металу визначається його здатністю чинити опір пластичній деформації та руйнуванню. Вона оцінюється за допомогою різних показників, таких як межа міцності, межа текучості, та відносне видовження. Твердість визначається здатністю матеріалу протистояти проникненню іншого тіла і часто вимірюється за шкалою Брінелля, Віккерса або Роквелла. Пластичність відображає здатність металу деформуватися без руйнування, тобто приймати нову форму під дією навантаження і зберігати її після зняття цього навантаження.

Міцність металу визначається за формулою:

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}$$

Пластичність - це залишкова здатність матеріалу змінювати свою зовнішню форму без її руйнування. Пластичність характеризується відносним подовженням δ або відносним звуженням ψ :

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

У полікристалах зсув відбувається спочатку в зернах з найбільшою дотичною напругою. У процесі цього частинки подрібнюються, скручуються та орієнтуються у певному напрямку відповідно до прикладеного навантаження. Орієнтована структура, що утворюється після пластичної деформації, називається текстурою (рис. 1). Наявність текстури або волокнистої структури додає властивостям металу анізотропію, тобто властивості залежать від напрямку прикладеного навантаження. Таким чином, для розриву уздовж волокна потрібне більше натягу, ніж для розтягування поперек волокна.

Перекручування кристалічної решітки супроводжується зниженням міцності, жорсткості і пластичності. Зміцнення металу при пластичній деформації називають деформацією.

Якщо клепакий метал нагріти вище певної температури, почнеться процес утворення нових кристалітів (зерен), які замінять деформовані кристаліти та відновлять початкові механічні властивості. Цей процес називається рекристалізацією, а відповідна термічна обробка — рекристалізаційним відпалом (рис. 2). [5]

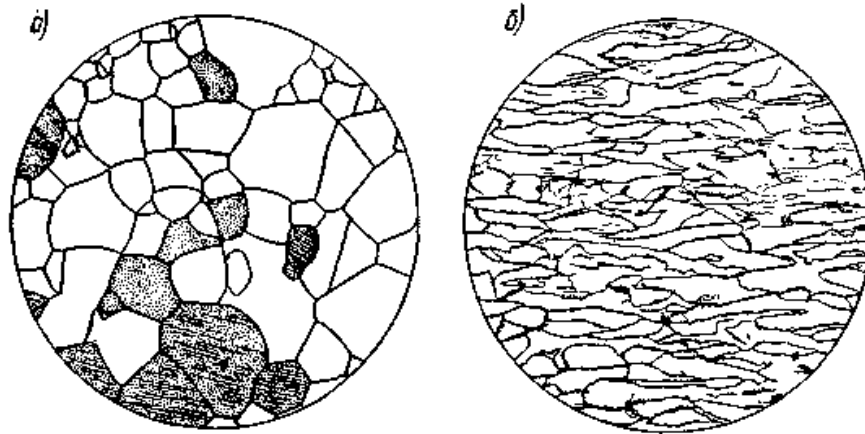


Рис. 2. Вплив пластичної деформації на мікроструктуру металу: а – до деформації; б – після деформації, $\times 200$

Температуру відпала можна приблизно визначити за формулою:

$$T_{рек} = a \cdot T_{пл}$$

Де $T_{рек}$ – поріг рекристалізації, тобто мінімальна температура, починаючи з якої буде відбуватися відновлення зернистої структури, K° ;

a - коефіцієнт, рівний 0,3...0,4 для чистих металів і 0,6...0,7 для сплавів;

$T_{пл}$ - температура плавлення, K° .

Термічна обробка (ТО) – це контрольований температурний вплив на металеві матеріали, спрямований на зміну їхньої внутрішньої структури з метою покращення або надання нових властивостей. Для багатьох, хто не має досвіду роботи з ТО, існує хибне уявлення, що вона використовується виключно для зміцнення матеріалів і що при цьому застосовуються надзвичайно високі температури.

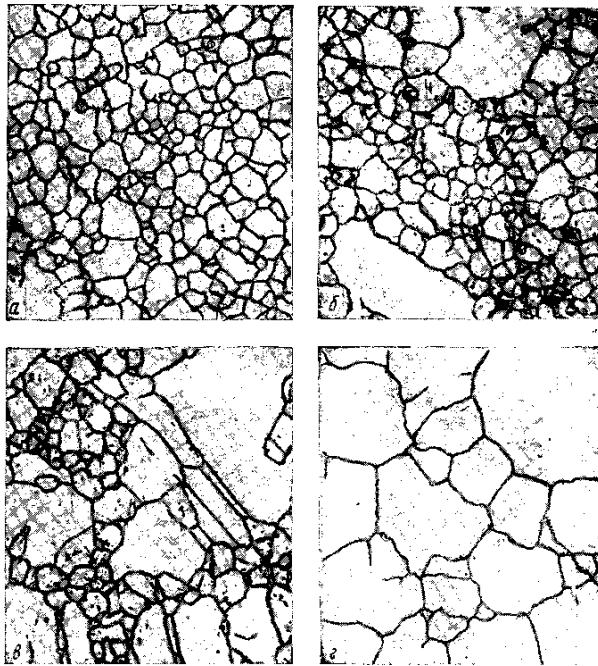


Рис. 3. Процес росту зерна при рекристалізації. $\times 100$

Крім того, у багатьох підручниках і фахових статтях термін «інтенсивна терапія» використовується виключно як синонім цього терміну. Однак це не зовсім так: залежно від використовуваного сплаву та техніки обслуговування його властивості можуть варіюватися в дуже широкому діапазоні - від надм'яких і пластичних до надзвичайно твердих і міцних.

Вид термічної обробки металів залежить від властивостей, які вони повинні мати після впливу. Наприклад, таких, здавалося б, непов'язаних властивостей, як міцність і пластичність, можна досягти шляхом застосування спеціальних режимів догляду (наприклад, для використання в якості матеріалу для корпусу). У той же час навіть незначний нагрів (а іноді навпаки - холодна обробка) може істотно змінити властивості металевих виробів. Для отримання необхідних міцнісних властивостей алюміній після екструзії піддається різним видам термічної обробки. Термічна обробка алюмінію — це процес підвищення міцності та твердості алюмінієвих сплавів (більш точно оброблених ливарних сплавів), які піддаються дисперсійному зміцненню. Термічна обробка також може знадобитися для деталей, які зазнають деформації, наприклад, під час руху.

Характеристиками термообробки алюмінію є відпал, гомогенізація та термічна обробка твердого розчину. Температура всередині печі коливається від 115 до 540 °С, залежно від конкретного використовуваного процесу. [6]

1.2. Структурні зміни при пластичній деформації кристалічних матеріалів

Руйнуванню полікристалів металів, які деформуються за умов активного навантаження, передує, як правило, значна пластична деформація. Вивчення пластичної деформації твердих тіл привертає увагу дослідників уже досить давно. Однак істотний прогрес у розумінні фізичних основ міцності та пластичності полікристалів і активний розвиток фізики пластичної деформації стали здійснюватися лише з початку минулого сторіччя. Було встановлено, що пластична деформація твердих тіл приводить до появи на їхній поверхні безлічі паралельних мікроскопічних сходів, названих смугами ковзання (рис. 4), які утворюються внаслідок зсуву шарів кристала відносно один одного, причому така зсувна деформація має кристалографічну природу [7].

Як відомо, у кристалах атоми розташовані в певному порядку і утворюють у просторі так звану кристалічну решітку. Можна уявити собі, що кристал макроскопічних розмірів складається з елементарних комірок – мінімальних об'ємів кристала (розміри ребра елементарної комірки порядку 10^{-10} – 10^{-9} м), які повністю відбивають всі його структурні властивості [8]. Кристали алюмінію, наприклад, мають гранецентровану кубічну (ГЦК) комірку, у якій атоми розташовуються у вершинах куба і у центрах всіх його граней (рис. 5).

Для опису кристалічних структур використовують кристалографічну систему координат, яку вибирають у відповідності до симетрії кристалу [8]. Початок координат сполучають із одним з вузлів (атомів) решітки, а координатні вісі спрямовують уздовж ребер елементарної комірки, умовно

вважаючи їхню довжину одиничною. При цьому напрямок уздовж вісі X позначають $[100]$, уздовж вісі Y – $[010]$, уздовж вісі Z – $[001]$ (рис. 6).

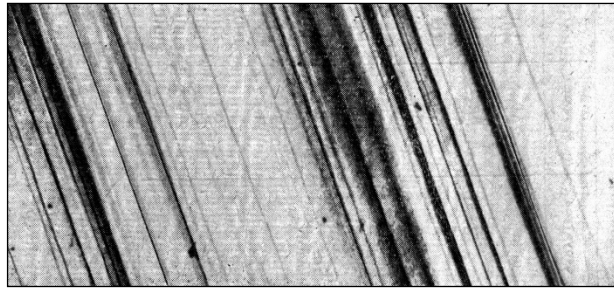


Рис. 4. Поверхня алюмінію після деформації на 30% при кімнатній температурі (більша частина ліній ковзання згрупована в смуги ковзання), $\times 12500$

Площини, що збігаються із гранями куба й перпендикулярні осям X , Y , Z , позначають відповідно (100) , (010) , (001) . Напрямки уздовж діагоналі граней позначають $[110]$, $[101]$, $[011]$, а кристалічні площини, перпендикулярні цим напрямкам, – відповідно (110) , (101) , (011) і, нарешті, напрямок просторової діагоналі куба – $[111]$, а перпендикулярні їй кристалічні площини – $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$.

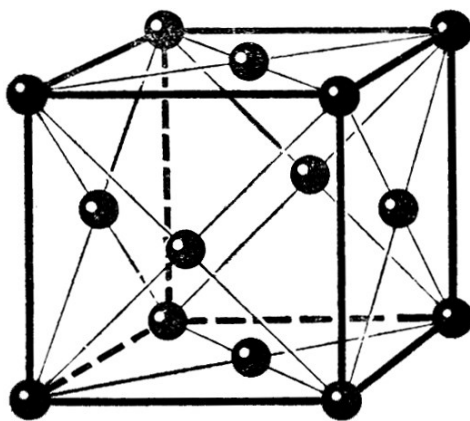


Рис. 5. Гранецентрована кубічна комірка

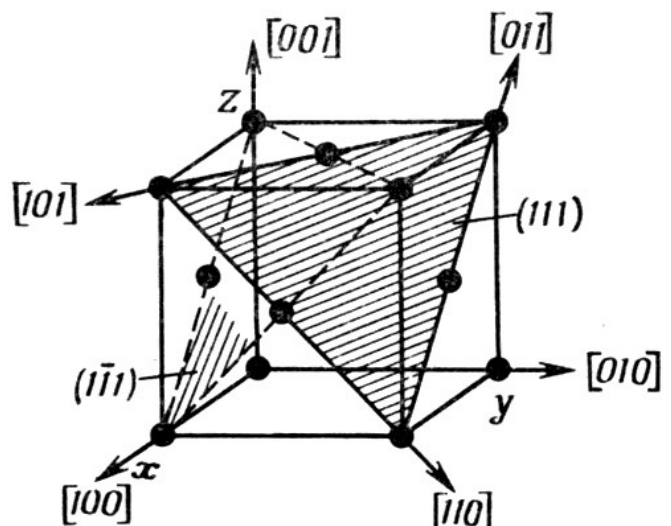


Рис. 6. Типові системи ковзання в ГЦК структурі

Інші напрямки в кристалі (рис. 7) також позначаються трьома певними цілими числами. Взагалі, у кристалографії прийнято характеризувати площини й нормалі до них так званими індексами Міллера – цілими числами h, k, l (від'ємність індексу позначається рискою зверху). Символ (hkl) характеризує сукупність паралельних площин, що проходять через вузли (атоми) кристалічної решітки,

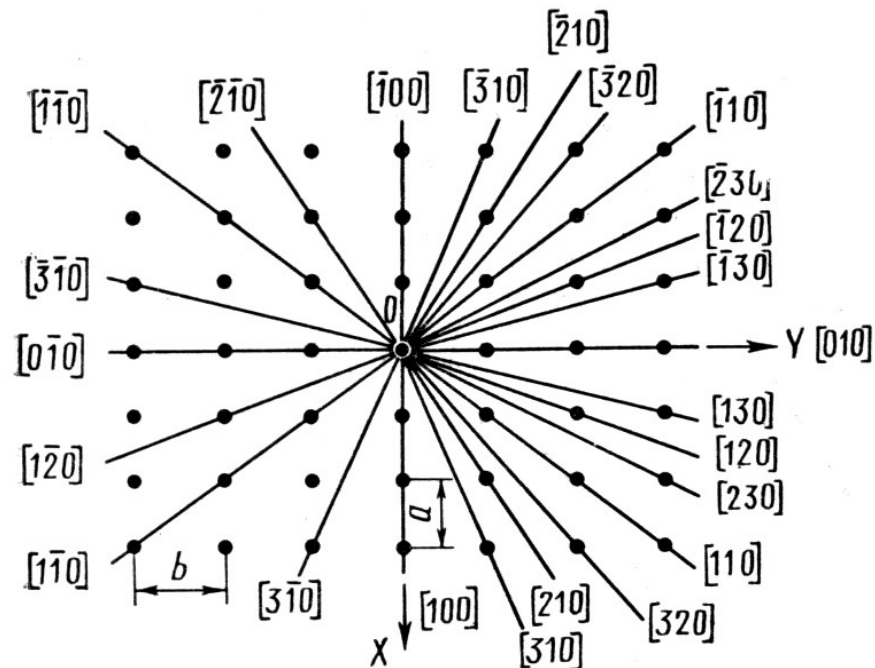


Рис. 7. Символи деяких напрямків у плоскій сітці а символ $[hkl]$ – кристалографічний напрямок, перпендикулярний цим площинам. Індеси Міллера кристалографічної площини (грані) являють собою величини, які обернено пропорційні відріzkам, що відтинаються площиною на осях координат X, Y, Z .

Як ми вже відзначали, у процесі пластичної деформації відбувається відносне зрушення шарів кристала в певній кристалографічній площині (площини ковзання) і певному кристалографічному напрямку (напрямку ковзання), що є в загальному випадку найбільш щільно впакованими у кристалічній решітці. Метали із ГЦК решіткою деформуються в першу чергу по щільно впакованих площинах (111) , $(\bar{1}11)$, $(1\bar{1}1)$ і $(\bar{1}\bar{1}1)$. Ці чотири площини є площинами октаедра й еквівалентні у фізичному відношенні

(характер розташування атомів у них той самий). Тому все сімейство площин октаедра позначається одним символом $\{111\}$. У кожній такій площині зрушення може здійснюватися в трьох найбільше щільно впакованих напрямках – напрямках уздовж діагоналей граней куба. Всі такі напрямки фізично еквівалентні й позначаються одним символом $\langle 110 \rangle$. Напрямок ковзання і площина ковзання утворюють у сукупності систему ковзання. Таким чином, у кристалах із ГЦК структурою існує 12 систем ковзання виду $\{111\}\langle 110 \rangle$.

Найважливішим кроком у розумінні фізичної природи пластичності кристалів з'явилося введення уявлень про дислокації як елементарних носіях пластичної деформації [1, 6, 9]. Виявилось, що в кристалах існують стабільні лінійні перекручування або дефекти (порушення правильності структури уздовж лінії) типу обриву або зрушення атомних шарів, які порушують правильність їхнього чергування в атомній решітці (рис. 8) [8]. Зайвий атомний шар, який називають екстраплощиною, пружно деформує решітку поблизу свого нижнього краю. Таким чином, уздовж лінії – краю екстраплощини – зосереджена область кристала з недосконалою решіткою. В одному вимірі довжина дефекту дорівнює довжині краю екстраплощини, а у двох інші – має малі розміри (порядку декількох міжатомних відстаней), якими можна знехтувати. Такий лінійний дефект одержав назву крайової дислокації. Як показали дослідження [6, 9], під дією прикладених механічних напружень σ відбувається рух дислокацій, що приводить до зсувів решітки (рис. 9). Таким чином, один з основних механізмів пластичної деформації являє собою дислокаційне ковзання.

Після відкриття дифракції рентгенівських променів на кристалічній решітці з'явилися нові можливості для дослідження структурних змін, які відбуваються під час пластичної деформації кристалів. Аналіз рентгенограм, отриманих від деформованих кристалів, показав, що в процесі деформації

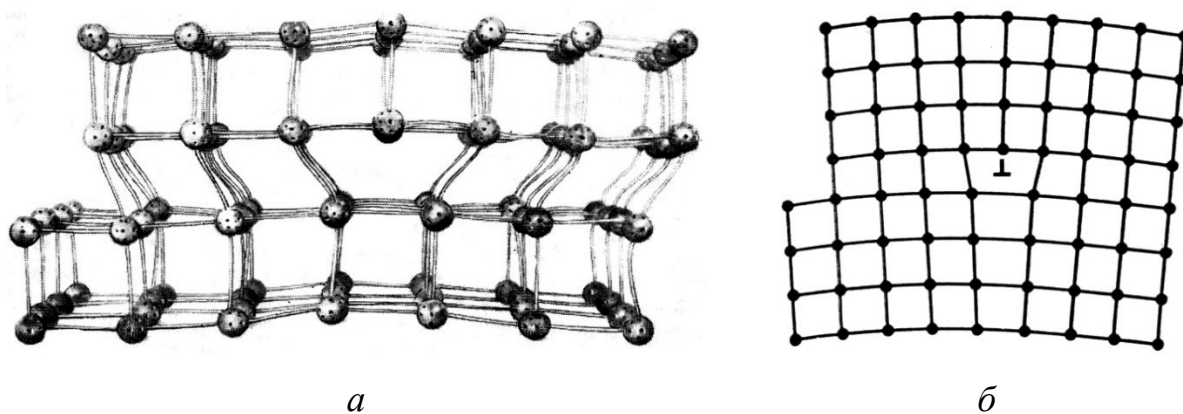


Рис. 8. Модель крайової дислокації з куль і дроту (а) та її схема (б)

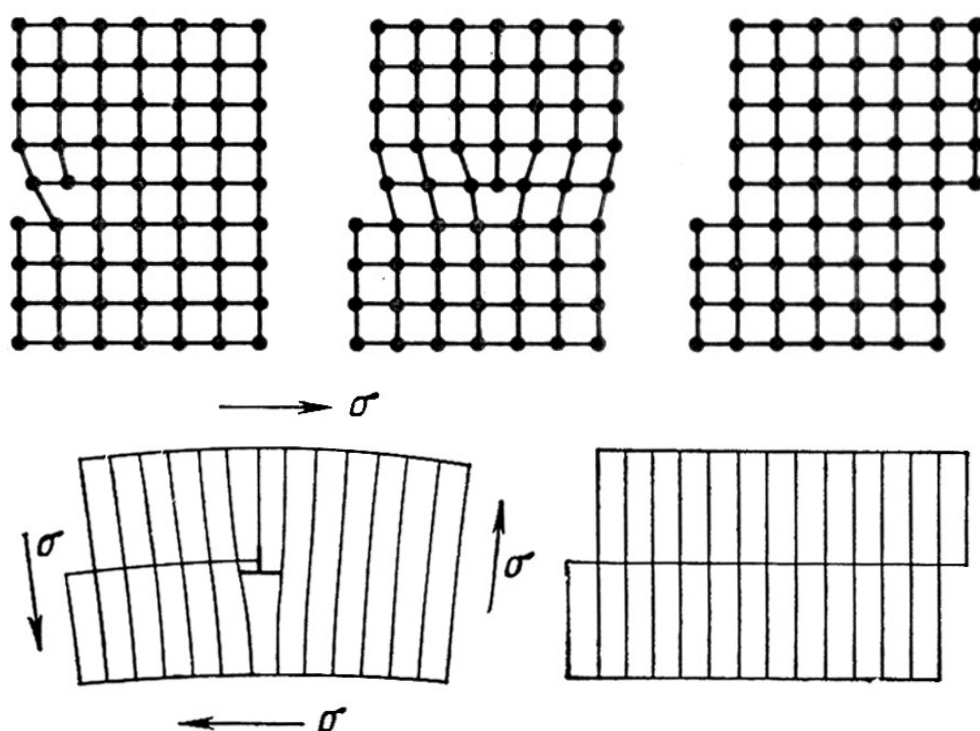


Рис. 9. Переміщення крайової дислокації по кристалу і утворення зрушення здійснюються не тільки пластичні зсуви решітки, але і її пластичні повороти – пластичні ротації (рис. 10).

Був накопичений значний експериментальний і теоретичний матеріал, який свідчить про те, що пластичні ротації виникають при всіх використовуваних на практиці режимах навантаження, у широкому інтервалі температур і швидкостей деформації, поза залежністю від вихідної структури матеріалу. Єдиною необхідною умовою є досягнення деякої граничної деформації.

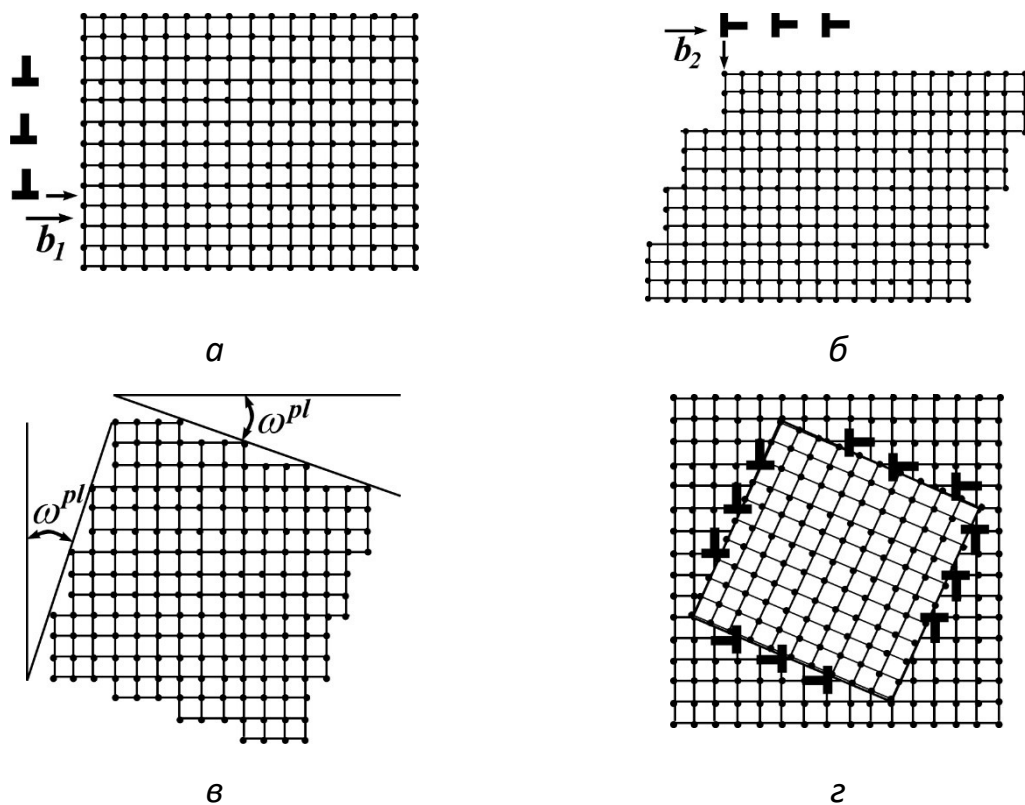


Рис. 10. Схема виникнення пластичного повороту (ротації) на кут ω у кристалі (г) внаслідок руху в його обмеженій області двох систем дислокацій b_1 і b_2 (а, б, в)

Як тільки її буде перевищено (якщо, звичайно, величина цієї граничної деформації не перевищує максимально можливої деформації до руйнування, як, наприклад, у випадку крихкого руйнування), настає фрагментація, і кристал, спочатку однорідний за орієнтацією, почне дробитися на разорієнтовані частини. Такі ротаційні процеси обумовлені нагромадженням у кристалі дислокацій (вони безупинно народжуються в процесі пластичної деформації) і виникненням колективних ефектів у їхніх групах (рис. 10) [8]. Інакше кажучи, взаємодія між дислокаціями стає настільки сильною, що вони втрачають свою індивідуальність і поведуться як погоджена група. Таке специфічне утворення – також лінійний дефект кристалічної структури – одержало назву часткової дисклінації. Це дало підставу розглядати у якості ще одного основного механізму пластичної деформації ротаційну (поворотну) моду, пов'язану із трансляційної (зсувною) модою, носієм якої є дислокації, за допомогою єдиного механічного поля.

МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

2.1. Виготовлення зразків.

Для даного дослідження були обрані двовимірні полікристали алюмінію. Полікристалічні зразки алюмінію розмірами робочої частини $100 \times 20 \times 0,15 \text{ мм}^3$ були вирізані з фольги чистотою 99,96%. Для досягнення необхідного середнього розміру зерен застосовувалися різні режими термомеханічної обробки. Необхідний середній розмір зерен досягався шляхом підбору режиму термомеханічної обробки, який включав декілька етапів.

Спочатку, зразки проходили процес термічного відпалу при певній температурі та тривалості для зняття внутрішніх напружень, пов'язаних з виготовленням та вирізанням з фольги. Зразки алюмінію відпалювали в муфельній печі МП-2 протягом 2 годин при температурі 400°C . Потім зразки деформували одноосьовим розтягуванням на розривній машині до ступенів деформації $\varepsilon = 1 - 10\%$ і відпалювали при температурах 300°C (2 години) та 630°C (2 години). Температуру зразків вимірювали за допомогою термопари хромель-алюмель.

Різні комбінації температури, часу відпалу і попереднє деформування дозволяли регулювати середній розмір зерен у широкому діапазоні, що було необхідно для подальших експериментальних досліджень.

В результаті термомеханічної обробки були отримані зразки з середнім розміром зерен в інтервалі від 1 до 55 нм. Для виявлення зеренної структури використовували метод хімічного травлення. Ця методика дозволяє візуалізувати межі зерен, що є важливим для аналізу мікроструктури матеріалу.

Процедура травлення проводилася з використанням травителя Келлера, який складався з наступних компонентів:

- 30 мл хлоридної кислоти (HCl),
- 20 мл азотної кислоти (HNO₃),
- 5 мл плавикової кислоти (HF),
- 30 мл дистильованої води (H₂O).

Зразки занурювали у травильний розчин на 30 секунд. Час травлення був обраний на основі попередніх експериментів для забезпечення оптимального контрасту зеренної структури. Після травлення зразки ретельно промивали дистильованою водою, щоб видалити залишки травителя, а потім сушили повітряним потоком.

Фотографії деяких зразків, отриманих після травлення, представлені на рис. 11. Вони демонструють чітко виражені межі зерен, що дозволяє провести детальний аналіз мікроструктури. Важливо відзначити, що розмір зерен має значний вплив на механічні властивості матеріалу, такі як міцність, твердість та пластичність. Тому аналіз зеренної структури є ключовим етапом у дослідженні властивостей матеріалів після термомеханічної обробки. Для визначення середнього розміру зерен \bar{d} (середнього умовного діаметра зерен) використовували два основні методи: метод випадкових січних та метод, заснований на підрахунку кількості зерен на одиницю поверхні зразка.

Метод випадкових січних передбачає нанесення випадкових ліній на поверхню металографічного зразка та підрахунок кількості зерен, перетнутих цими лініями. Цей метод дозволяє визначити середній умовний діаметр зерен шляхом розрахунку середньої кількості перетинів на одиницю довжини січної лінії. Цей підхід має високу точність і дозволяє отримати статистично обґрунтовані дані про розмір зерен.

Метод підрахунку кількості зерен на одиницю поверхні зразка полягає у визначенні кількості зерен, які містяться у відомій площі поверхні зразка. Для цього зразок піддають мікроскопічному аналізу, під час якого на зображення накладають сітку з відомими розмірами, і підраховують кількість зерен у кожному осередку сітки. Потім, на основі отриманих даних, розраховують середню кількість зерен на одиницю площі та обчислюють середній умовний діаметр зерен. Цей метод також дозволяє оцінити неоднорідність розмірів зерен у зразку. Обидва методи дозволили точно оцінити структуру та розмір зерен у зразках після проведеної термомеханічної обробки.

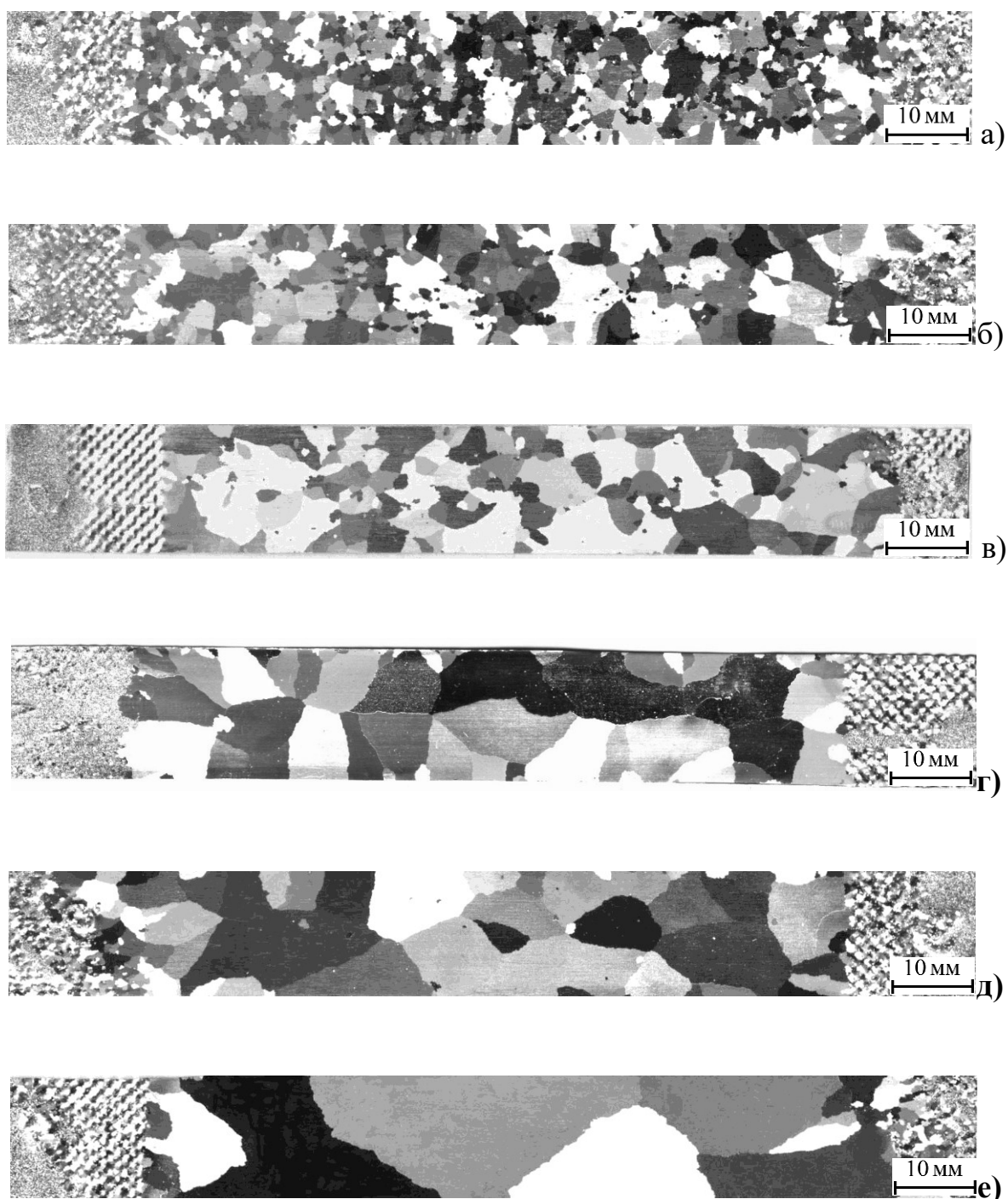


Рис. 11. Об'єкти дослідження – двовимірні полікристали алюмінію з різним розміром зерен. Середній розмір зерен \bar{d} складав: а) 2 мм; б) 4 мм; в) 6 мм; г) 9 мм; д) 15 мм; е) 29 мм.

2.2. Механічні випробування зразків.

Двовимірні полікристали алюмінію деформували розтягуванням в умовах активного навантаження і доводили до руйнування. Зразки випробовували на повітрі при постійній швидкості руху захоплення 0,4 мм/хв

і кімнатній температурі в розривній машині, схема якої показана на рис. 12. Для дослідження виникнення і розвитку оптично видимих тріщин була використана методика спостереження структурних змін на поверхні двовимірних полікристалів алюмінію безпосередньо в процесі їх пластичної деформації. Вона заснована на використанні розсіювання білого світла поверхнею попередньо травленого зразка.

Розсіювання білого світла на поверхневому рельєфі зерен, що виникає в результаті хімічного травлення, призводить до їх кольорового фарбування, яке реєструється WEB-камерою. Камера встановлюється на спеціальному столику перед зразком (рис. 12). Між камерою і зразком кріпиться система лінз, яка дає можливість отримати збільшене і чітке зображення поверхні зразка. По спеціальному кабелю це зображення передається в ПК. Схема освітлення зразка показана на рис. 13. На зразок (1) спрямований білий світло від двох джерел: лампи розжарювання (17 В, 170 Вт) (4) і люмінесцентної лампи ЛД20-2 (5). Перший джерело світла знаходиться поблизу зразка на відстані 20 см, другий видалений від зразка на відстань 200 см. Зйомка поверхні зразка здійснюється за допомогою WEB-камери Logitech C920 (3) з роздільною здатністю 150 точок на дюйм, пов'язаної з комп'ютером.

Відеозображення розбивали по кадрах за допомогою програми VirtualDub 1.5.0.

Запис деформаційних кривих здійснювали в автоматичному режимі. Для цього використовували цифровий мультиметр UT 70D, підключений до ПК через інфрачервоний порт. Точність реєстрації деформуючого напруження становила 0,01 г/мм².

Таким чином, безпосередньо в процесі деформування на ПК одночасно надходила інформація про структурні зміни на поверхні зразка та про деформуюче напруження на зразку, тобто синхронно записувалися зображення поверхні зразка та діаграма розтягування.

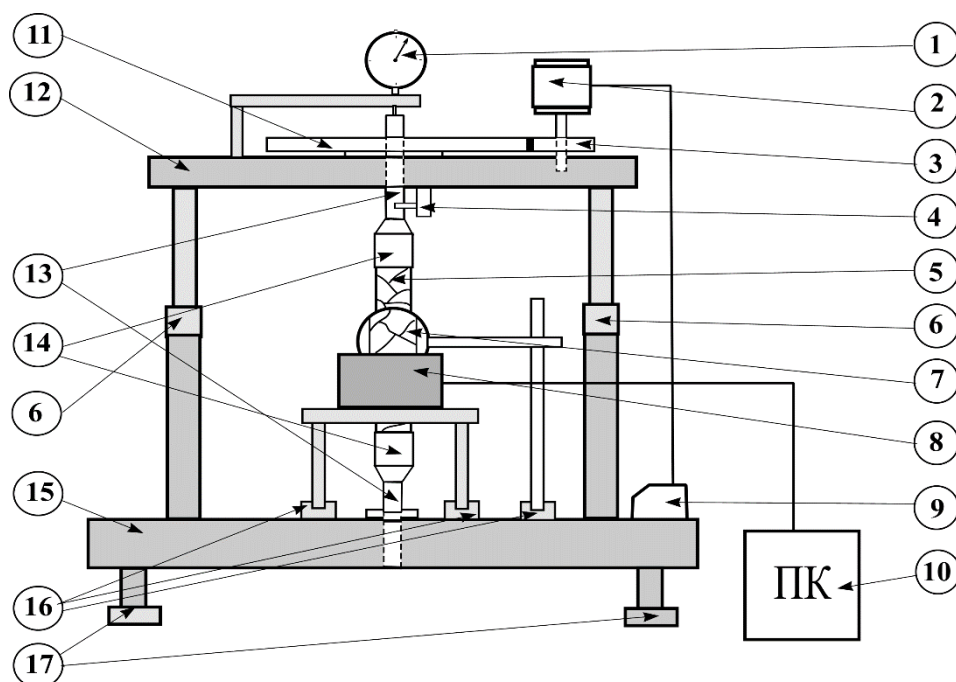


Рис. 12. Схема установки для дослідження виникнення та розвитку оптично видимих тріщин у зразку в процесі його пластичного деформування (вид спереду):

1 - індикатор годинникового типу; 2 – електричний реверсивний двигун; 3, 11 – ведуча и відома шестерні; 4 – стопорний гвинт; 5 – зразок; 6 – опори; 7 – система лінз; 8 – відеокамера; 9 – перемикач; 10 – ПК; 12, 15 – верхня та нижня платформи; 13 – верхня та нижня тяги; 14 – захвати; 16 – направляюча для переміщення столика і пристрою для фокусування; 17 – стійки для регулювання рівня.

☆5

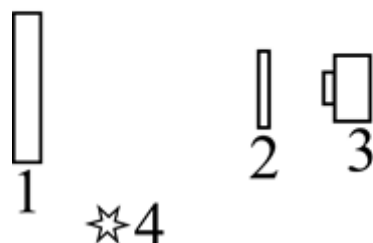


Рис. 13. Схема проведення експерименту з використанням білого світла. (1 – зразок, 2 – система лінз, 3 – Web – камера, 4 – лампа накаливання, 5 – люмінесцентна лампа).

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ЇХ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1. Особливості досліджень в процесі деформування двовимірних полікристалів

Добре відомо, що міцність конструкційних матеріалів (реальних полікристалів) визначається характером руйнування. Значення межі міцності можуть змінюватися на порядок величини залежно від вмісту домішок, умов деформування та структурного стану. Незважаючи на велику кількість експериментальних і теоретичних робіт, присвячених цій проблемі, ймовірність прогнозування механічних характеристик матеріалів низька. Однією з основних причин цього є недостатній експериментальний рівень досліджень механізмів виникнення і розвитку тріщин на різних масштабних рівнях залежно від структурних характеристик зразків. Це особливо стосується характеристик зернистої структури (оскільки реальні полікристалічні об'єкти містять велику кількість зерен, які відрізняються за формою, розмірами, орієнтацією відносно зовнішнього прикладеного напруження). Руйнування зразків завжди починається з виникнення і розвитку макроскопічної тріщини. У цьому зв'язку великий інтерес становлять дослідження зародження і розвитку оптично видимих тріщин безпосередньо в процесі пластичної деформації полікристалів з різною зернистою структурою. Як показують попередні експерименти, найбільш зручним об'єктом дослідження є двомірні, тобто однокристалічні по товщині, полікристали з різним розміром зерен. У таких зразках через їх однокристалічність всі ефекти, пов'язані з виникненням і розвитком тріщин, можна спостерігати безпосередньо на поверхні зразка. Таким чином, знімається серйозна проблема з'ясування характеру поширення тріщини в об'ємі зразка, оскільки спостережувані макроскопічні структурні зміни на поверхні є одночасно і змінами в об'ємі. Експериментальні дослідження показують, що якісні зміни в характері пластичної деформації відбуваються лише при переході від

двовірних до одновірних полікристалів, тому закономірності і механізми пластичної деформації і руйнування, виявлені при дослідженні двовірних полікристалів, можуть бути використані для встановлення фізичної сутності деформаційних процесів і в тривірних полікристалах. Двовірні полікристали знаходять самостійне практичне застосування як полікристалічні плівки та фольга, які експлуатуються в умовах дії механічних напружень. Все це зумовило вибір двовірних полікристалів алюмінію як об'єктів дослідження.

3.2. Вплив зеренної структури на характер деформування двовірних полікристалів алюмінію

У даній роботі були отримані двовірні полікристали алюмінію з різним середнім розміром зерен у діапазоні від 1 мм до 55 мм за допомогою різних режимів термомеханічної обробки. Деформування зразків проводилося на установці, схема якої наведена на рис. 12. Таким чином, безпосередньо в процесі деформування досліджували характер виникнення і розвитку тріщин у двовірних полікристалах алюмінію з різним розміром зерен. Основні результати наведені на рисунках 14 – 16. На рис. 14 представлена типова деформаційна крива для всіх досліджених зразків. За своїм характером (виглядом) деформаційні криві, отримані для зразків з різним розміром зерна, практично не відрізняються і мають стандартний для полікристалів вигляд, проте чітко простежується залежність межі пластичності ε_{\max} від середнього розміру зерен. Це монотонно зростаюча залежність (рис. 15). Величина межі пластичності виявляється максимальною для крупнокристалічних зразків, що містять у робочій частині кілька зерен (рис. 11). Значення ε_{\max} зумовлене характером руйнування.

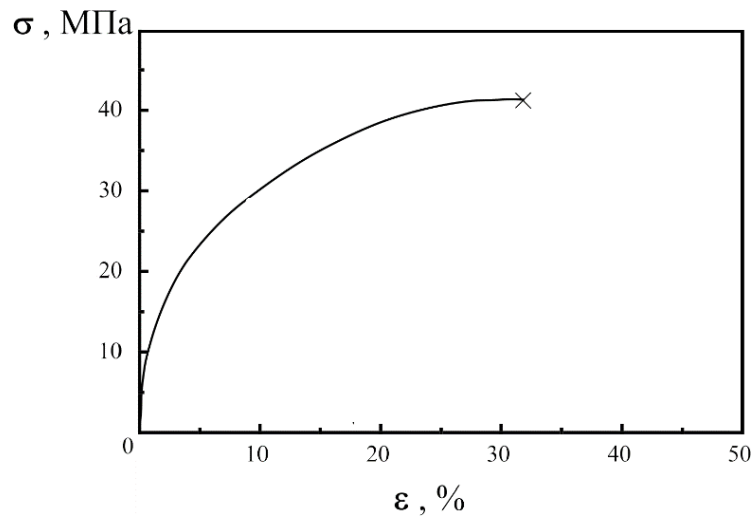


Рис. 14. Типовий вид деформаційних кривих для двовимірних полікристалів алюмінію.

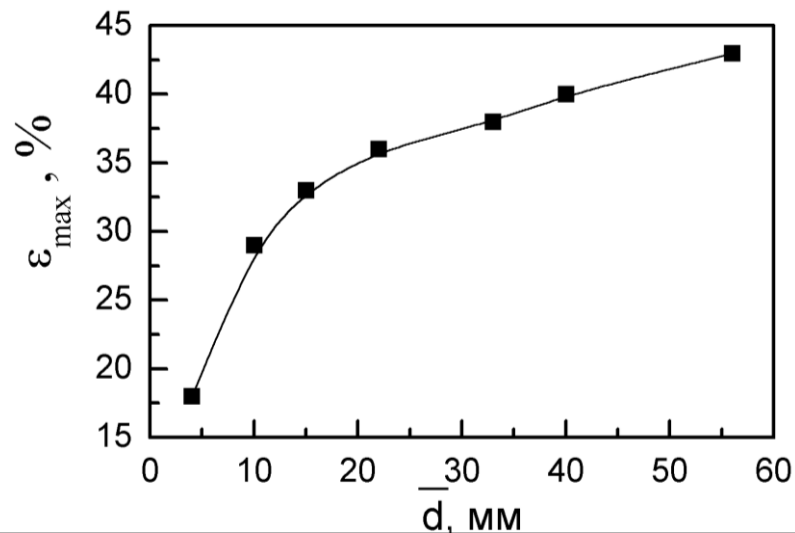


Рис. 15. Залежність максимальної деформації до зруйнування від середнього розміру зерен зразків алюмінію.

На рисунках 16(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. У крупнокристалічних зразках (рис. 16 в) (>15 мм) максимальна деформація до руйнування досягає 45%, а у зразках із середнім розміром зерен (рис. 16 б) $5 \text{ мм} << 15 \text{ мм}$ може досягати 35%.

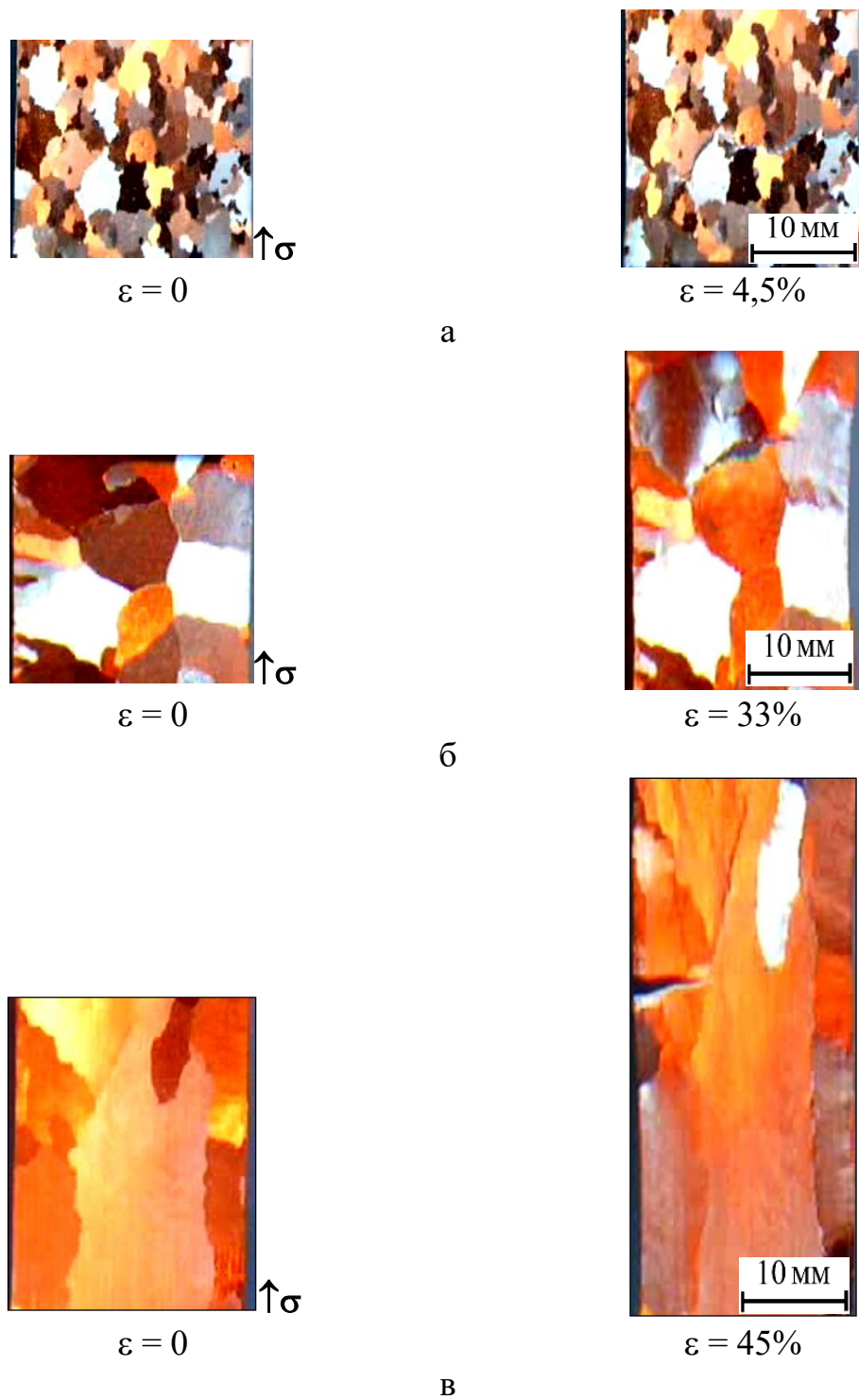


Рис. 16. Фотографії полікристалічних зразків алюмінію до деформування та після деформування.

(Стрілкою показано напрямок діючого напруження)..

ВИСНОВКИ

1. Досліджено процес пластичної деформації у двовимірних полікристалах алюмінію з різним середнім розміром зерен у інтервалі $1 \text{ мм} < \bar{d} < 55 \text{ мм}$.
2. Встановлено, що в крупнокристалічних зразках алюмінію ($\bar{d} > 15 \text{ мм}$) зразках максимальна деформація до руйнування досягає 45%, а у зразках із середнім розміром зерен $5 \text{ мм} < \bar{d} < 15 \text{ мм}$ досягає 35%. Для дрібнозернистих зразків ($\bar{d} < 3 \text{ мм}$), складає декілька відсотків.
3. Показано, що величина максимальної деформації до руйнування у досліджених двовимірних полікристалах алюмінію збільшується із зростанням середнього розміру зерен зразків.

Список використаної літератури

1. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Практикум: [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. за напрямом «Інж. механіка»] / В. В. Попович, А. І. Кондир, Е. І. Плешаков та ін. – Львів: Світ, 2009. –51 с.
2. Рекристалізація металів. Старіння сплавів: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізичного матеріалознавства / Укладачі: Бадіян Є.Є., Тонкопряд А.Г., Шурінов Р.В. - Х.: ХНУ імені В.М. Каразіна, 2013. – 36 с.
3. Металознавство: Підручник /О.М.Бялік, В.С.Черненко та ін. – 2-ге вид., перер. і доп. – К. ІВЦ "Політехніка", 2002. 384 с.
4. Натапов Б. С. Термічна обробка металів: Навч. посібник для вузів. – Київ: Вища школа. Головне вид-во, 1980.-288 с.
5. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с.
6. Матеріалознавство та термічна обробка металів. Підручник./ Кузін О.А., Яцюк Р.А. – Львів: Афіша. 2002. – 304 с.
7. Рід Д. "Механічні властивості твердих тіл." Київ: Наукова думка, 1973.
8. Калінін, В. В. "Деформація та руйнування матеріалів." Київ: Техніка, 1989.
9. Лавренко, В. О. "Дефектна структура і фізичні властивості матеріалів." Харків: Видавництво ХНУ, 2003.
10. Хироши Когуре, Наото Уно. "Основи деформації та руйнування матеріалів." Київ: Наукова думка, 1992.