

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

«Допущено до захисту»

Оцінка «___»

В.о. зав. кафедри фізики твердого тіла

Голова ЕК

проф. Зиман З.З. _____

«___»

«___»

Сімшаг Анастасія Олегівна

**Вплив покриття із нітриду титану на механічні властивості фольг
алюмінію**

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

Науковий керівник: канд. фіз.-мат. наук,
доц. кафедри фізики твердого тіла
Тонкопряд А.Г.

Рецензент: канд. фіз.-мат. наук, доц.
кафедри фізики кристалів Богданов В.В.

Харків 2025

ЗМІСТ

1. Аналітичний огляд літератури	5
1.1. Закономірності розвитку пластичної деформації моно- та полікристалів	6
1.2. Характеристики міцності та пластичності полікристалічних зразків, які одержують за умов активного розтягування	13
1.3. Методи підвищення зміцнення функціональних матеріалів	16
1.3.а. Метод азотування	17
1.3.б. Метод лазерного зміцнення	22
1.3.в. Металізація (метод покриття)	24
2. Експериментальна частина: дослідження впливу наявності всебічного покриття з нітриду титану на фольгах алюмінію на механічні характеристики зразків	25
2.1. Об'єкт дослідження та методика проведення експерименту	26
2.2. Експериментальні результати та їх обговорення	29
2.2.а. Деформаційні криві для зразків фольг алюмінію з різним розміром зерна без покриття та зі всебічним поверхневим покриттям із нітриду титана	29
2.2.б. Деформаційне зміцнення зразків, що досліджувалися. Мікроструктура поверхні зразків фольг алюмінію з поверхневим покриттям із нітриду титана після деформування	35
2.2.в. Механічні характеристики зразків фольг алюмінію з покриттям із нітриду титану та без нього	38
Висновки	42
Список використаної літератури	43

АНОТАЦІЯ

Сімшаг А. О. Вплив покриття із нітриду титану на механічні властивості фольг алюмінію.- Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 104 Фізика та астрономія освітньо-професійна програма «фізика» – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, 2025. –45 с. - Рис. 17. - Табл. 1.

Метою даної роботи є дослідження впливу наявності тонкого (~ 3 мкм) всебічного покриття з нітриду титану, нанесеного шляхом іонно-плазмового напилення, на поверхні двовимірних полікристалічних зразків Al у вигляді фольг, товщиною 150 мкм, з різним розміром зерна на характеристики міцності та пластичності досліджуваних зразків.

Вивчення закономірностей розвитку пластичної деформації в зразках, що деформуються за умов активно навантаження, та аналіз результатів дозволили встановити, що наявність покриття з нітриду титану на фольг Al призводить до істотного підвищення умовної границі плинності $\sigma_{0,2}$ (більш ніж на 35%) та значного підвищення коефіцієнта деформаційного зміцнення на початковій (до 3-4% деформації) стадії пластичної деформації; практично не впливає на величину границі міцності σ_b незалежно від величини розміру зерна та призводить до зниження максимальної деформації ϵ_{max} зразків фольг Al практично вдвічі. Ці результати дозволяють зробити висновок, що всебічне поверхневе покриття з нітриду титану, товщиною ~ 3 мкм, на двовимірних зразках фольг Al, товщиною 150 мкм, є **зміцнювальним покриттям** тільки на початковій (перехідній) стадії пластичної деформації.

Ключові слова: пластична деформація, зміцнююче покриття з нітриду титану, деформаційна крива, характеристики міцності та пластичності.

ANNOTATION

Simshag A. O. The influence of titanium nitride coating on the mechanical properties of aluminum foils.- Manuscript.

Thesis for the degree of «Bachelor» in the field of training 104 Physics and Astronomy educational and professional program – “physics”. – V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2025. - 42p. - Fig. 17. - Tab. 1.

The aim of this work is to study the influence of the presence of a thin ($\sim 3 \mu\text{m}$) all-round coating of titanium nitride, applied by ion-plasma sputtering, on the surface of two-dimensional polycrystalline Al samples in the form of foils, $150 \mu\text{m}$ thick, with different grain sizes on the characteristics of strength and plasticity of the studied samples.

The study of the patterns of plastic deformation development in samples deformed under active loading conditions and the analysis of the results allowed us to establish that the presence of a titanium nitride coating on Al foil leads to a significant increase in the conditional yield strength $\sigma_{0.2}$ (more than 35%) and a significant increase in the strain hardening coefficient at the initial (up to 3-4% deformation) stage of plastic deformation; it practically does not affect the value of the ultimate strength σ_v regardless of the grain size and leads to a decrease in the maximum deformation ε_{max} of Al foil samples almost twice. These results allow us to conclude that a comprehensive surface coating of titanium nitride, with a thickness of $\sim 3 \mu\text{m}$, on two-dimensional Al foil samples, with a thickness of $150 \mu\text{m}$, is a strengthening coating only at the initial (transitional) stage of plastic deformation.

Keywords: plastic deformation, strengthening coatings of titanium nitride, deformation curve, strength and plasticity characteristics.

1. Аналітичний огляд літератури

Вивчення механізмів пластичної деформації та зміцнення матеріалів є важливим напрямом сучасного матеріалознавства, оскільки саме від цих процесів залежить довговічність і надійність конструкційних елементів у різних галузях техніки. У цій частині роботи розглядаються три ключові аспекти, пов'язані з механічною поведінкою моно- та полікристалів у процесі пластичної деформації та зміцнення. По-перше, аналізуються закономірності розвитку пластичної деформації в моно- та полікристалах, що дозволяє розкрити особливості дислокаційних процесів, вплив міжзеренних границь та механізми накопичення деформаційних дефектів. Це є необхідним для розуміння механічної поведінки матеріалів за різних умов навантаження. По-друге, розглядаються характеристики міцності та пластичності полікристалічних зразків, які визначаються в умовах активного розтягування. По-третє, розглядаються методи підвищення зміцнення функціональних матеріалів, які спрямовані на покращення експлуатаційних характеристик шляхом контрольованого впливу на мікроструктуру. До таких методів належать термомеханічна обробка, легування, наноструктурування та інші сучасні підходи, що дозволяють оптимізувати механічні властивості матеріалів.

Джерелом кількісної і якісної інформації відносно параметрів міцності і пластичності та характеру деформації можуть бути діаграми (деформаційні криві) деформації. Криві деформації одержують на спеціальних установках для різних типів випробувань. Найпоширеніший вид деформаційних випробувань зразків матеріалу – одноосьове розтягування. При розтягуванні зразків діаграми деформації записуються або будуються в координатах «навантаження - подовження» ($P - \Delta l$) або «напруження- деформація» ($\sigma - \varepsilon$) [1].

1.1. Закономірності розвитку пластичної деформації моно- та полікристалів

Дослідження закономірностей розвитку пластичної деформації в моно- та полікристалічних матеріалах є одним із ключових напрямів сучасної матеріалознавчої науки. Вивчення закономірностей та механізмів деформації, формування дислокаційних структур та особливостей руйнування дозволяє прогнозувати поведінку матеріалів у різних експлуатаційних умовах та створювати нові високоміцні конструкційні матеріали.

Моно- та полікристалічні структури мають суттєві відмінності у своїх механічних властивостях, обумовлені як внутрішньою мікроструктурною будовою, так і зовнішніми чинниками навантаження. У монокристалах процеси пластичної деформації більш передбачувані, оскільки вони не містять міжзеренних границь, які є основним джерелом концентрації напружень у полікристалах. У свою чергу, полікристалічні матеріали демонструють складніші закономірності деформації через взаємодію зерен, їхню орієнтацію та міжфазні взаємодії.

Експериментально встановлено, що для пластичних металів і сплавів залежність «напруження-деформація» (σ – ϵ) в режимі пластичного деформування характеризується чітко виділеними стадіями з різною інтенсивністю деформаційного зміцнення. Для розуміння природи та механізмів пластичної деформації металевих матеріалів важливо вивчити явище ступінчастості цих залежностей. В даний час відомо, що ступінчастість пластичної деформації залежить від властивостей і структурного стану досліджуваного матеріалу, а також значною мірою визначається еволюцією дефектної структури металів і сплавів.[1-2].

Основними механізмами пластичної деформації в *монокристалах* є ковзання та двійникування.

Головний тип навантаження, що спричиняє незворотне зміщення атомів один відносно одного без руйнування зв'язків між ними, – це зсув. При прикладанні зовнішнього навантаження в матеріалі з'являються зсувні напруження. Якщо ці напруження перевищують критичне напруження ковзання (границя плинності), починається пластична деформація. У зв'язку з цим основним механізмом цієї деформації є дислокаційний. Ковзання дислокацій відбувається під дією зсувного навантаження по визначених площинах ковзання (найбільш густо упакованих атомних площинах) уздовж кристалографічних напрямків ковзання [3-4].

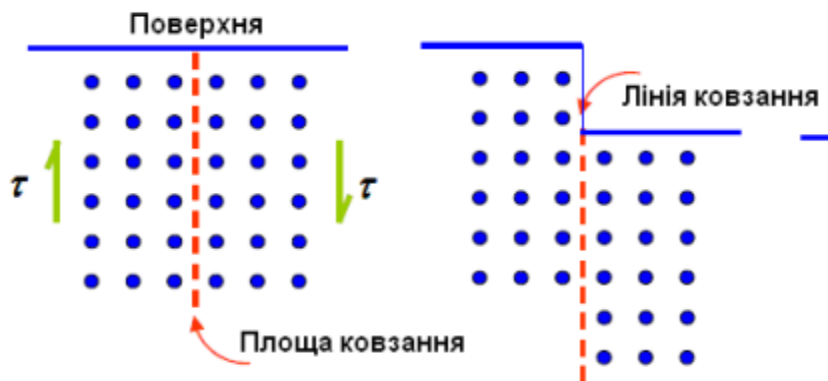


Рис. 1. Схема пластичної деформації в монокристалі методом ковзання

У металах з об'ємно-центрованою кубічною кристалічною ґраткою (ОЦК-метали, до яких належать Fe, Mo, Nb), процес ковзання відбувається по площинам типу (110), (211), (321) в напрямку ковзання $\langle 111 \rangle$ (див.рис. 2а). У металах, які характеризуються гранецентрованою кубічною ґраткою (ГЦК-метали, такі як Cu, Al, Ni), основною площиною для ковзання виступають площини типу (111), напрямок ковзання визначається напрямками типу

$\langle 110 \rangle$ (див. рис. 2б).

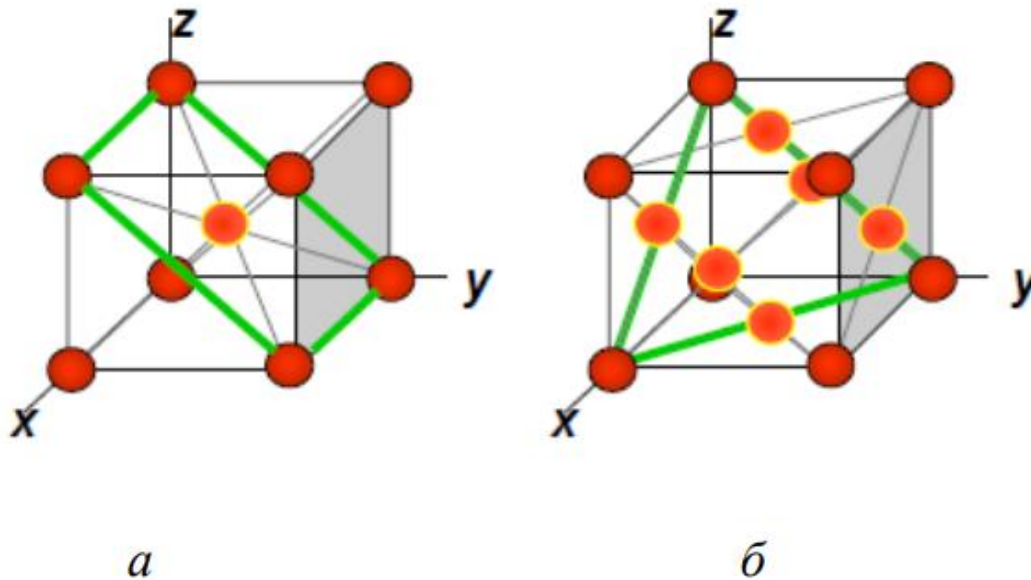


Рис. 2. Площини ковзання у кристалічних решітках: а - об'ємноцентрована кубічна решітка; б - гранецентрована кубічна решітка.

Двійникування є значно рідкіснішим механізмом, що виникає в умовах, коли ковзання є загальмованим. Це механізм пластичної деформації, при якому частина кристалу зміщується дзеркально відносно іншої частини по певній площині, утворюючи двійникові границі. У площині двійникування в подальшому можлива додаткова пластична деформація. Цей процес спостерігається в умовах, коли ковзання ускладнене, наприклад, при низьких температурах та високих швидкостях деформування, або у кристалах з обмеженою кількістю площин ковзання (ГПУ-метали, такі як Mg, Ti, Zr). Двійникування відбувається раптово, на відміну від поступового ковзання. Частина атомів переміщується так, що утворюється дзеркально симетрична область відносно площини двійникування, що називається двійником деформації. Двійник може рости по всьому кристалу або обмежується певною зоною, причому, при збільшенні навантаження можуть з'являтися нові двійники.

Утворені двійники змінюють загальну форму кристалу та можуть взаємодіяти як між собою, так і з дислокаціями. Однак результативна деформація при такому механізмі зазвичай менша, ніж при ковзанні [2-4].

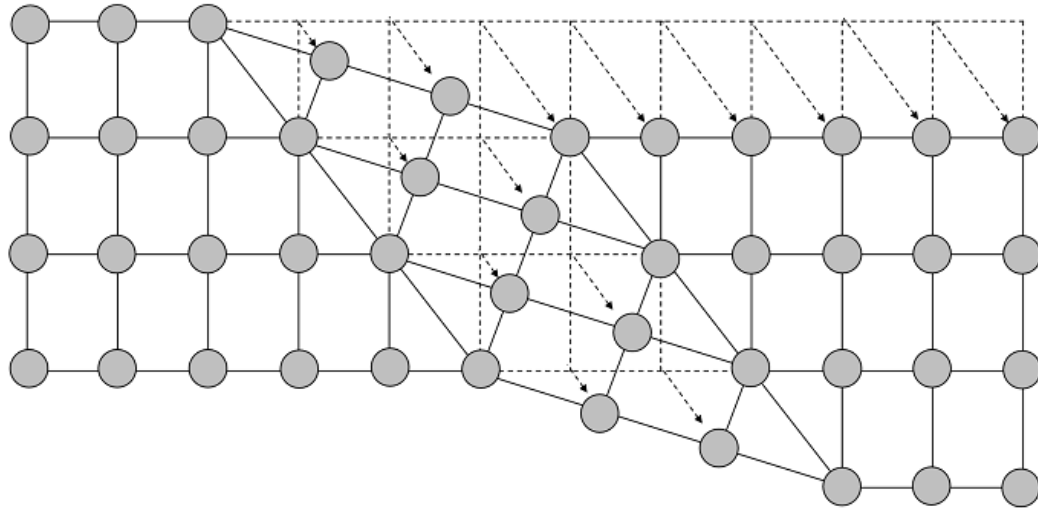


Рис. 3. Схема пластичної деформації в монокристалі методом двійникування

Деформаційні криві "напруження-деформація" для монокристалів відображають механічну поведінку матеріалу під час прикладання навантаження та показують залежність між напруженням, що виникає в матеріалі, та його деформацією. Форма цих кривих, а отже, і механічні властивості монокристалів, залежать від ряду факторів, таких як тип кристалічної решітки, температура, швидкість деформації, орієнтації кристала та інші [2-3].

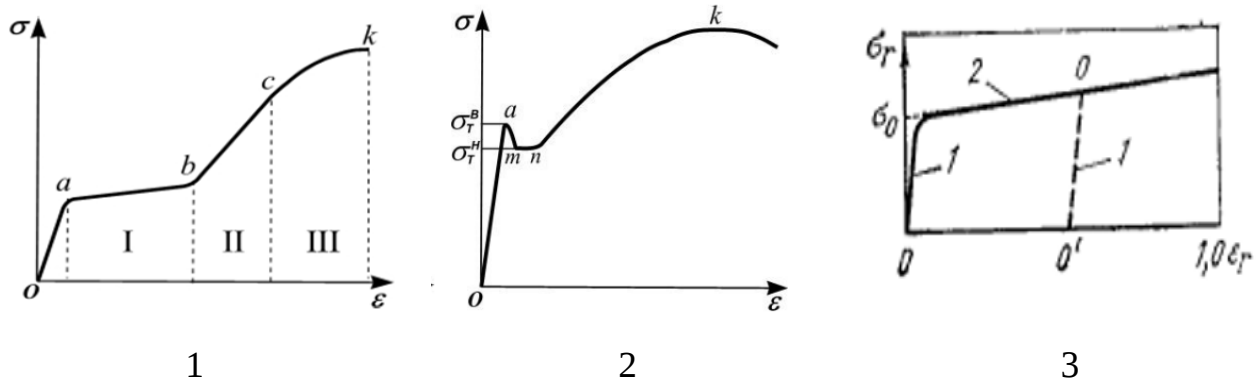


Рис. 4. Типові схеми кривої "напруження - деформація" для монокристалів з ГЦК ґраткою (1); з ОЦК ґраткою (2); з ГПУ ґраткою (3).

Загалом на кривій, що описує закономірність розвитку пластичної деформації в монокристалі, можна виділити чотири стадії (рис. 4.1), що характеризуються різним коефіцієнтом деформаційного зміцнення.

Початкова стадія кривої Oa (рис. 4.1, 4.2) відповідає пружній деформації, де коефіцієнт деформаційного зміцнення визначається модулем пружності. Оскільки величина пружної деформації зазвичай дуже мала, ділянка Oa на експериментальних кривих практично збігається з віссю напружень.

Перша стадія зміцнення (ab) - це стадія легкого ковзання. Тут дислокації переміщуються відносно безперешкодно, забезпечуючи прогресуюче подовження (деформація досягає 5-20%) без помітного зростання діючих напружень. Коефіцієнт зміцнення на цій стадії малий ($\sim 10^{-4}G$).

При подальшій деформації швидкість зміцнення зростає і на кривій деформації з'являється *друга стадія* (bc) - *стадія множинного ковзання* дислокацій у двох і більше системах. На цій стадії ковзання розвивається за кількома системами ковзання. Дислокації сильно взаємодіють і заважають одна

одній вільно переміщуватися по кристалу, що призводить до збільшення напруження, тобто до зміцнення кристала. Нахил кривої дорівнює $\sim 3 \times 10^{-3} G$).

За деформацій близько 30-50% (точне значення залежить від температури випробування) настає *третьє стадія (ск)*, на якій швидкість деформаційного зміцнення зменшується зі зростанням деформації, а деформація збільшується з напруженням приблизно за параболічним законом. Ця стадія починається за високих напружень, достатніх для того, щоб гвинтові дислокації, раніше нерухомі, стали долати потенційні бар'єри. Чим вища температура деформації, тим раніше починається стадія III, однак вона може бути відсутня, якщо зразок деформувати за температури, близької до абсолютного нуля [1-4].

Більшість конструкційних матеріалів, що використовуються на практиці, мають *полікристалічну* будову. Принципова відмінність полікристалів від монокристалів полягає в тому, що полікристали являють собою сукупність зерен різної орієнтації та мають протяжну мережу границь зерен з різною структурою. Зерна полікристалів відрізняються між собою за формою, розмірами та типом, мають різне орієнтування відносно діючого напруження. Процеси, які забезпечують розвиток пластичної деформації полікристалів, є такими самими, як у випадку деформації монокристалів, але мають кілька важливих особливостей.

Оскільки зерна - це монокристали, які хаотично орієнтовані один відносно одного, то ковзання під час дії зовнішніх сил розпочинається не у всіх зернах одночасно, тобто деформація від самого початку протікає неоднорідно. Зерна, що найсприятливіше орієнтовані відносно напрямку діючого напруження, починають деформуватися першими. Таких зерен у зразку, як правило, відносно мало і вони розміщені в зразку на відстані. Для подальшої деформації зразка необхідна участь у деформації більшості зерен. Отже, необхідно забезпечити

самоузгоджену деформацію всіх зерен, виключаючи можливість порушення суцільності зразка в процесі деформування.

Діаграма деформації пластичної деформації полікристалів, як і діаграма деформації для монокристалів, має однаковий стадійний характер незалежно від типу кристалічної ґратки. На рис. 5 представлена схема типової деформаційної кривої для полікристала, на якій можна виділити кілька стадій. Слід зазначити, що стадія легкого ковзання при деформації полікристалів відсутня.

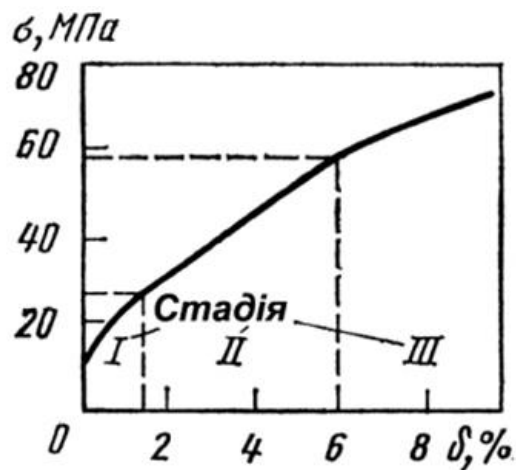


Рис. 5. Схема типової кривої для полікристалів із гцк-ґраткою

Як правило, на деформаційній кривій спостерігаються три стадії зміцнення: одразу ж за пружною областю і до деформації 1-2% спостерігається *перша стадія - перехідна*, далі йде прямолінійна ділянка кривої - *друга стадія*, за нею настає *третьа стадія* – приблизно параболічна залежність. На цій стадії гвинтові дислокації, колись блоковані перешкодами на своїх площинах ковзання, виявляються здатними до поперечного ковзання. При цьому пластична деформація протікає зі зменшенням коефіцієнта деформаційного зміцнення [3].

1.2 Характеристики міцності та пластичності полікристалічних зразків, які одержують за умов активного розтягування

Визначення характеристик міцності та пластичності полікристалічних матеріалів є ключовим завданням сучасного матеріалознавства, оскільки ці властивості свідчать про їхню працездатність у різних умовах експлуатації. Особливо важливим є дослідження поведінки полікристалічних зразків за умов активного розтягування, коли матеріал зазнає значних механічних навантажень, що можуть призвести до його пластичної деформації або руйнування. Випробування активного розтягування з постійною швидкістю є найпоширенішим видом випробувань для оцінки механічних властивостей металів та сплавів - порівняно легко піддаються аналізу, дозволяють за результатами одного досвіду визначати одразу кілька важливих механічних характеристик матеріалу, що є критерієм його якості та необхідним для конструкторських розрахунків.

Механічні властивості при розтягуванні, як і при інших статичних випробуваннях, можуть бути поділені на три основні групи: міцнісні, пластичні та характеристики в'язкості. Ми ж будемо розглядати перші дві групи. Характеристики міцності - це характеристики опору матеріалу зразка деформації або руйнуванню. Більшість стандартних характеристик міцності розраховують за положенням певних точок на діаграмі деформації. Зазвичай їх визначають за первинними кривими розтягування в координатах «навантаження-подовження» або після обробки даних «напруження- деформація».

До характеристик міцності належать: умовна границя пружності, умовна границя плинності(текучості), границя міцності (тимчасовий опір) та деформаційне зміцнення, яке характеризується коефіцієнтом деформаційного зміцнення.

Границя пружності характеризує напруження, за якого з'являються перші ознаки макроскопічної деформації. Зазвичай визначають *умовну границю пружності* – це напруження, за яким залишкове подовження зразка досягає заданої величини (зазвичай 0,05 %, іноді 0,005 %). Для визначення умовної границі пружності потрібна прецезійна апаратура.

Границя плинності характеризує напруження, за яким відбувається більш плавний перехід до пластичної деформації. Частіше на практиці визначають *умовну границю плинності* – це напруження, за яким залишкова деформація зразка досягає заданої величини (зазвичай 0,2%, інколи 0,1 або 0,3%). Напруження, необхідне для початку пластичної деформації, визначається силами опору руху дислокацій усередині зерен, легкістю передавання деформації через границі зерен, розміром зерна. Ці фактори і визначають величину умовної границі плинності. Від умовної границі пружності величина умовної границі плинності відрізняється тільки величиною допуску деформації. У разі, коли на кривій розтягування реєструють зуб і майданчик плинності, визначають величину *фізичної границі плинності* - напруження, за яким зразок деформується під дією практично незмінного навантаження, що розтягує (визначають за положенням майданчика плинності на кривій розтягування).

Границя міцності - це максимальне напруження, яке матеріал може витримати перед руйнуванням. Ця характеристика показує, яке максимальне напруження може витримати матеріал без руйнування. Це найвища точка на деформаційній кривій, після якої в матеріалі найчастіше формується шийка (локальне звуження) і, зрештою, відбувається руйнування зразка.

Коефіцієнт деформаційного зміцнення показує, наскільки матеріал стає міцнішим при пластичній деформації. Тобто, наскільки важче стає його деформувати, коли він вже був деформований. Ця характеристика потрібна для

того, щоб передбачити, як матеріал буде реагувати на подальшу деформацію, наприклад, при формуванні деталей. Коефіцієнт деформаційного зміцнення визначається на ділянці пластичної деформації кривої «напруження-деформація» для певної деформації зразка. У визначеній точці на деформаційній кривій проводиться дотична і визначається тангенс кута нахилу дотичної у даній точці кривої до осі абсцис: $n = d\sigma/d\varepsilon$. Ця величина і є кількісною характеристикою деформаційного зміцнення – коефіцієнт деформаційного зміцнення. Чим він вищий, тим швидше матеріал зміцнюється при деформації, однак це може призвести до крихкості [1, 3, 4].

До основних характеристик пластичності полікристалічних зразків відносять *максимальне відносне подовження та відносне звуження* зразка. Характеристики пластичності визначаються після проведення експерименту.

Максимальне відносне подовження є важливим показником для інженерів, оскільки воно показує, наскільки матеріал може деформуватися без руйнування та допомагає передбачити, як матеріал буде реагувати на навантаження. Фактично визначає здатність матеріалу до пластичної деформації перед руйнуванням. Для знаходження цього значення треба виміряти початкову довжину зразка (L_0) та після руйнування (L). Розраховується за формулою $\varepsilon = (L - L_0) / L_0$ та зазвичай виражається у відсотках. Високе значення відносного подовження вказує на високу пластичність матеріалу. Можна визначити максимальну деформацію зразка і по діаграмі деформації. Для цього з максимальної точки на деформаційній кривій проводимо лінію, паралельну лінії на початку деформаційній кривій, яка відповідає області пружної деформації, до перетинання з віссю абсцис. Ця точка і відповідає максимальній відносній деформації зразка.

Так само, як і відносне подовження, *відносне звуження* є важливим показником, оскільки також характеризує наскільки матеріал може деформуватися без руйнування. Однак, якщо попереднє значення базувалось на довжині зразка, ця характеристика визначається з площі поперечного перерізу зразка. Відносне звуження показує, наскільки зменшилася площа поперечного перерізу зразка в місці розриву, порівняно з її початковою площею. Для визначення вимірюємо початкову площу поперечного перерізу зразка (A_0) та площу поперечного перерізу в місці розриву (A), та розраховуємо за формулою $\psi = ((A_0 - A) / A_0) * 100\%$.

1.3. Методи підвищення зміцнення функціональних матеріалів

Функціональні матеріали відіграють ключову роль у сучасній науці та техніці, забезпечуючи високі експлуатаційні характеристики в різних сферах – від електроніки до авіаційної промисловості. Зміцнення цих матеріалів є критично важливим завданням, яке дозволяє підвищити їхню довговічність, стійкість до зношування, корозії та екстремальних умов експлуатації.

Існує дуже багато методів підвищення міцності функціональних матеріалів, однак я б хотіла зупинитись на трьох із них - метод азотування, метод лазерного зміцнення та металізація.

1.3.а . Метод азотування

Азотування - це процес хіміко-термічної обробки, під час якого поверхневий шар металевого виробу насичується азотом. Внаслідок цього утворюється нітридний шар, який значно підвищує твердість, зносостійкість і корозійну стійкість деталі. Цей метод має ряд переваг, які роблять його популярним у різних галузях промисловості. По-перше, азотування значно

збільшує твердість поверхневого шару металу та підвищує стійкість до корозії, що робить його більш стійким до зношування, стирання та інших видів механічного впливу. По-друге, процес азотування зазвичай не викликає значних деформацій виробу, тому може застосовуватися для обробки деталей складної форми, включаючи важкодоступні місця. По-третє, азотування є відносно недорогим та ефективним методом зміцнення металів, що робить його економічно вигідним для багатьох виробництв[5].

Для проведення процесу азотування використовується спеціалізована муфельна піч (рис.6), обладнана герметично закриваючимися дверцятами та здатна підтримувати температуру в діапазоні 500–600 градусів за Цельсієм.

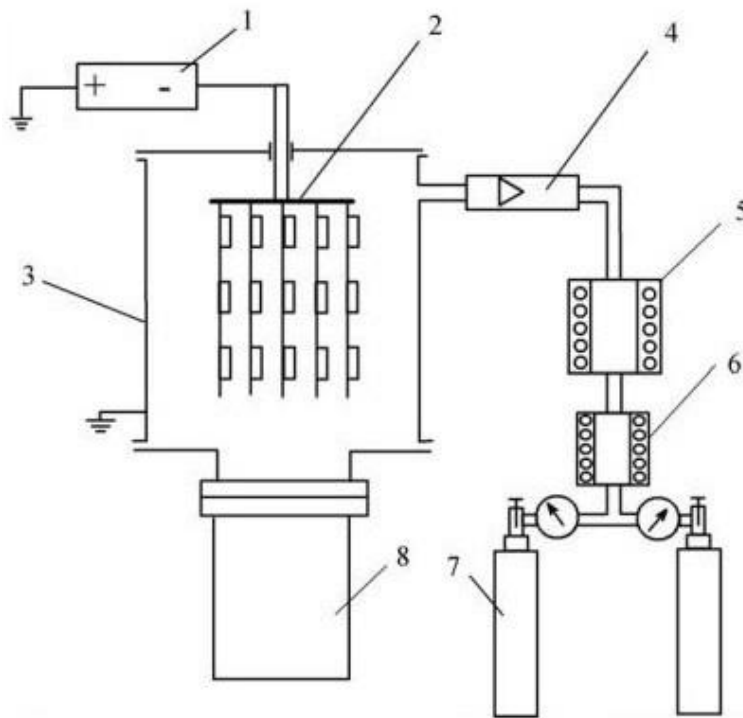


Рис. 6. Схема муфельної печі для азотування: 1 - джерело живлення; 2 - заготовка з виробами; 3 - вакуумна камера; 4 - ротаметр; 5,6 - фільтри; 7 - балони з газом; 8 - форвакуумний насос.

Після того, як поверхня заготовки, розміщеної в печі, досягає необхідної температури, її протягом визначеного часу утримують у цьому стані. На наступному етапі в робочу камеру починають подавати аміак (2NH_3) під тиском. В умовах підвищеної температури молекули аміаку дисоціюють на компоненти: атоми азоту (2N) і водню (6H). Атомарний азот дифундує в поверхневий шар сталі, утворюючи нітриди — сполуки, які характеризуються значною твердістю. Саме вони забезпечують зміцнення металу та формування азотованого шару. Для збереження утвореного нітридного шару та запобігання його окисленню важливо уникнути різких змін температури після завершення процесу, тобто рекомендується поступове охолодження деталі разом із камерою муфельної печі [6].

Процес азотування сталі реалізується за різними технологіями, кожна з яких обирається залежно від типу металу та необхідних параметрів кінцевого продукту. Ефективність засвоєння азоту значною мірою залежить від застосованого робочого середовища, яке також впливає на характеристику поверхневого шару або швидкість проведення операції. Основними методами азотування визнано три підходи: азотування у соляних ваннах, газове азотування та іонно-плазмове азотування.

Азотування в соляних ваннах - це процес хіміко-термічної обробки, під час якого поверхневий шар металевого виробу насичується азотом шляхом занурення в розплавлену соляну ванну, що містить активні компоненти азоту. Температура ванни зазвичай становить 500-600 °C. Виріб витримується в соляній ванні протягом певного часу, протягом якого відбувається дифузія азоту в поверхневий шар металу, а після охолоджується в маслі або на повітрі. У порівнянні з іншими методами, такими як газове та плазмове азотування, азотування в соляних ваннах характеризується меншою глибиною азотованого

шару. Однак цей метод демонструє вищі показники корозійної стійкості та зменшену шорсткість обробленої поверхні. Головною перевагою є здатність оперативно забезпечити необхідні експлуатаційні властивості, що сприяє зниженню тривалості технологічного процесу та його загальної вартості.

Газове азотування - це процес хіміко-термічної обробки, під час якого поверхневий шар металевого виробу насичується азотом шляхом нагрівання в спеціальній печі в газовому середовищі, що містить аміак (NH_3). Піч нагрівається до температури азотування, яка зазвичай становить 500-600 °C та подається аміак (NH_3), який при високій температурі розпадається на азот і водень. Виріб витримується в печі протягом певного часу, протягом якого відбувається дифузія азоту в поверхневий шар металу а потім охолоджується в печі або на повітрі [7].

Іонно-плазмове азотування (ІПА) - це прогресивний метод зміцнення поверхні металевих виробів, який базується на використанні плазми газового розряду для насичення поверхневого шару азотом. Цей процес відбувається у вакуумній камері, де створюється плазма, що містить іони азоту. Для цього зазвичай використовується суміш газів, таких як азот, аргон або водень. Іони азоту, прискорені електричним полем, бомбардують поверхню виробу, внаслідок чого відбувається дифузія азоту в поверхневий шар металу. Утворюються нітриди, які мають високу твердість та зносостійкість. Після азотування виріб охолоджується у вакуумній камері або на повітрі [8]. Для проведення процесів *іонно-плазмового азотування* застосовують спеціалізовані установки, у яких відбувається нагрів виробів завдяки катодній обробці, а саме: за рахунок катодного бомбардування іонами.

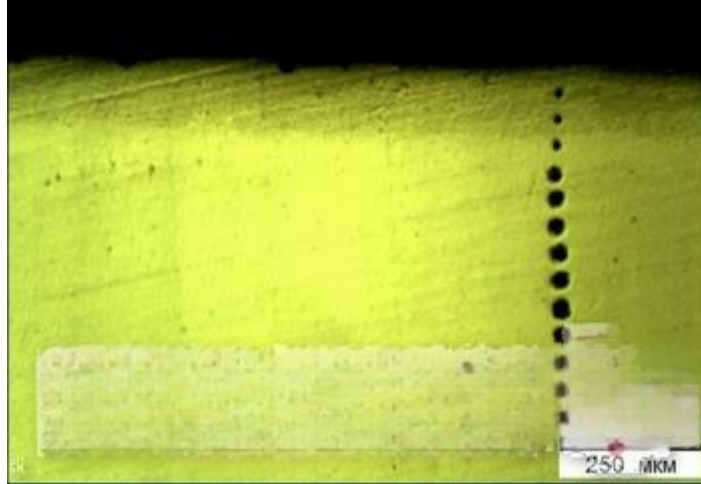


Рис.7. Ряд відбитків мікротвердоміра на сталевому зразку після азотування.

Азотування підвищує твердість і ізносостійкість поверхні сталі. На рис. 7 показано серію відбитків під час вимірювання мікротвердості на поперечному шліфі азотованого зразка. Вгорі - зміцнений шар (темна смуга). Діаметр відбитків знижується в міру наближення до поверхні, що свідчить про підвищення твердості в приповерхневому зміцненому шарі [9].

Результати, які наведені в роботі [10], показують, що іонна імплантація та іонно-плазмове нанесення покриттів підвищують твердість і коефіцієнт пружності поверхневого шару $Zr1\%Nb$ та сильну залежність властивостей покриттів від їхнього складу. Також показано, що якщо процес нанесення покриття протікає за умов безперервного бомбардування іонами більш низьких енергій, то це призводить до утворення періодично повторюваних стискальних і розтягувальних напружень на межі розділу покриття-підкладка. Така обробка поверхні формує комірчасту структуру із зон видавлювання та вдавлювання, тобто поверхню періодично повторюваних виступів та ямок субмікронного розміру.

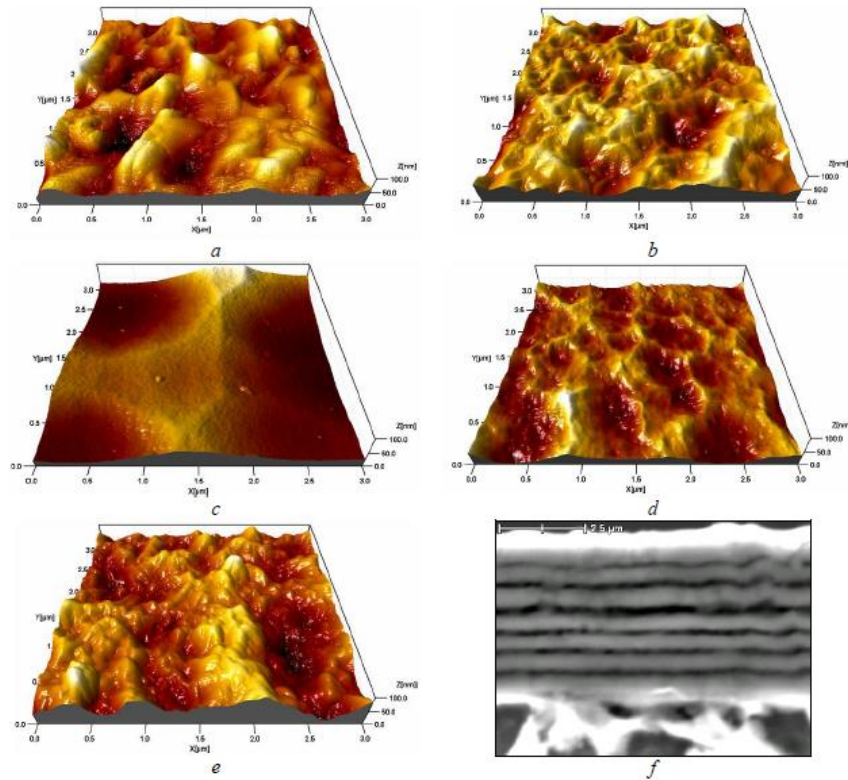


Рис. 8. АСМ зображення морфології поверхні покриття: TiN (а); TiAlN (б); TiAlSiN (с); TiAlYN (д), та (Ti+TiN)_x (д); SEM зображення зламу багатошарового (Ti+TiN)_x покриття (f)

Це відбивається на морфології поверхні покриття, представленої на рис. 8. Розмір комірчастої структури залежить від складу покриття і параметрів процесу осадження. Зазначено, що для прогнозування зміни макромеханічних характеристик дуже важливо враховувати цей ефект "шахового" розподілу напружень і деформацій на границі модифікований поверхневий шар-підкладка.

1.3.6 Метод лазерного зміцнення

Лазерна обробка - це сучасний та ефективний метод зміцнення функціональних матеріалів, який базується на використанні концентрованого пучка світлового випромінювання (лазера) для зміни властивостей поверхневого шару матеріалу. На рис.9 приведена узагальнена функціональна схема

технологічної лазерної установки. Порівняно з традиційними методами поверхневого зміцнення, такими як полум'яне або індукційне загартування, лазерне зміцнення має ряд переваг. Однією з істотних переваг є можливість точного контролю глибини зміцненого шару, яка може змінюватись від кількох мікрон до кількох міліметрів. Крім того, лазерне зміцнення забезпечує чудову просторову і термічну однорідність, що дозволяє більш рівномірно розподіляти твердість оброблюваної поверхні. Ще однією важливою перевагою є те, що це безконтактний процес, що зводить до мінімуму ризик спотворення, деформації або забруднення матеріалу, що обробляється. Крім того, це енергозберігаючий процес з мінімальними відходами та впливом на навколишнє середовище, що робить його більш стійким варіантом. Однак лазерне загартування також має деякі обмеження. Наприклад, він не підходить для обробки великих деталей чи деталей складної форми [11].

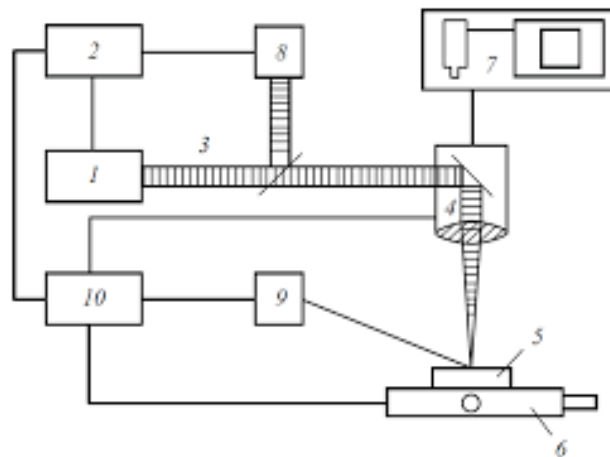


Рис.9. Узагальнена функціональна схема технологічної лазерної установки: 1 – лазерний випромінювач, 2 – блок живлення лазера, 3 – пучок лазерного випромінювання, 4 – фокусуюча оптична система, 5 – оброблювана деталь, 6 – координатний стіл, 7 – система візуального контролю зони лазерної обробки, 8 – система контролю параметрів лазера, 9 – система контролю технологічного процесу, 10 – мікропроцесор[11].

Зміцнення матеріалу під впливом лазерного променя відбувається завдяки надзвичайно високим швидкостям нагрівання в обмеженій зоні пучка - зазвичай 1000-1500°C. Під час цього процесу відбувається часткове насичення поверхні матеріалу азотом, вуглецем або іншими елементами, що можуть походити зі спеціального покриття чи різного середовища. Після припинення лазерного впливу матеріал швидко охолоджується за рахунок тепловідведення вглиб деталі та утворюється загартована(зміцнена) мікроструктура, що підвищує міцність матеріалу через збільшення кількості дислокацій. Як було написано раніше, завдяки цьому методу можливо контролювати глибину зміцненого шару(залежить від швидкості обробки та інтенсивності імпульсу лазера), зазвичай вона становить 0,2-1,5 мм [12,13].

1.3.в Металізація (метод покриття)

Метод покриття полягає в нанесенні на поверхню основного матеріалу тонкого шару іншого матеріалу, який має кращі механічні, фізичні або хімічні властивості. Покриття виконує захисну функцію, запобігаючи контакту основного матеріалу з агресивним середовищем, високими температурами або механічними пошкодженнями. Воно також може забезпечити додаткове зміцнення поверхні, підвищуючи її твердість та зносостійкість. Існує декілька способів нанесення зміцнюючого шару на матеріал, і кожен із них має свої особливості [14-16].

Гальванічне покриття - це процес нанесення тонкого шару металу на поверхню іншого матеріалу за допомогою електрохімічного методу. Деталь, на яку буде наноситися покриття(катод), підвішується на спеціальному підвісі та занурюється в електролітичну ванну, де також занурюють анод, виготовлений з металу, що буде наноситись. Через електролітичну ванну пропускається постійний електричний струм. Під його дією іони металу з розчину електроліту

починають рухатися до катода та осідати на його поверхні, утворюючи тонкий металевий шар. Після завершення процесу покрита деталь промивається водою для видалення залишків електроліту та сушиться.

Вакуумне напилення - це процес нанесення тонкого шару металу на поверхню іншого матеріалу у вакуумі. Підготовлений матеріал(деталь та метал, який буде наноситись на поверхню) завантажується у вакуумну камеру, де створюється високий вакуум для видалення газів та інших домішок. Метал нагрівається до температури випаровування, де його пари конденсуються на поверхні деталі, утворюючи тонкий металевий шар. Після завершення процесу матеріал повільно охолоджується та вивантажується з вакуумної камери [17].

Газотермічне напилення - це процес нанесення тонкого шару металу або іншого матеріалу на поверхню виробу за допомогою розплавлених частинок, які прискорюються газовим струменем. Матеріал, який буде наноситися на поверхню, завантажується в спеціальний пристрій – напилювач. Він може бути у вигляді порошку, дроту або стрижня. Матеріал розплавляється за допомогою джерела тепла, яке може бути газовим полум'ям, електричною дугою або плазмовим струменем, та його частинки прискорюються газовим струменем та направляються на поверхню виробу. Ці частинки, зіштовхуючись з поверхнею виробу, деформуються та утворюють щільний шар покриття. Після нанесення покриття виріб охолоджується та може бути підданий додатковій обробці для поліпшення його властивостей [16, 17].

Хімічне осадження з газової фази - це процес нанесення тонких плівок матеріалу на поверхню підкладки за допомогою хімічної реакції між газоподібними речовинами. Підготовлена підкладка завантажується в спеціальний реактор, де буде відбуватися процес осадження. В ньому подаються газоподібні речовини - прекурсори, які містять елементи, що входять до складу

плівки. Під впливом температури, тиску або інших факторів в реакторі відбувається хімічна реакція між прекурсорами, в результаті чого на поверхні підкладки утворюється тонка плівка матеріалу. Потім побічні продукти реакції видаляють з реактора, підкладку з нанесеною плівкою охолоджують та вивантажують [18]. Загалом, металізація є універсальним методом, який дозволяє значно поліпшити властивості матеріалів та розширити їх можливості застосування.

2. Експериментальна частина: дослідження впливу наявності всебічного покриття з нітриду титану на фольгах алюмінію на механічні характеристики зразків

Метою даної роботи є дослідження впливу наявності тонкого (~ 3 мкм) всебічного покриття з нітриду титану на поверхні двовимірних полікристалічних зразків алюмінію у вигляді фольг, товщиною 150 мкм, з різним розміром зерна на характеристики міцності та пластичності досліджуваних зразків і встановлення закономірності розвитку пластичної деформації в таких зразках.

Для досягнення мети в роботі було поставлено такі завдання:

1. Отримати двовимірні зразки фольг Al з різним середнім розміром зерна (~ 3 мм, ~ 8 мм).
2. Нанести на половину виготовлених зразків Al всебічне покриття з нітриду титану, товщиною ~ 3 мкм.
3. Провести механічні випробування отриманих зразків Al (без покриття і з покриттям) за умов активного одноосного розтягування зі швидкістю деформації

$\dot{\epsilon}=5 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ за кімнатної температури; дослідити мікроструктуру поверхні зразків за допомогою оптичної та растрової мікроскопії.

4. Отримати криві в координатах $\sigma = f(\epsilon)$ ("напруження-деформація") для всіх досліджуваних зразків.

5. За отриманими деформаційними кривими визначити механічні характеристики для всіх досліджуваних зразків: умовну границю плинності $\sigma_{0,2}$, границю міцності σ_b (тимчасовий опір), максимальну деформацію зразків $\epsilon_{\max}$.

6. Отримати залежності коефіцієнта деформаційного зміцнення від деформації та проаналізувати роль покриття з нітриду титану в деформаційному зміцненні фольг Al.

7. Провести порівняльний аналіз даних, отриманих для зразків алюмінію без і з покриттям з нітриду титану, і встановити вплив наявності покриття на механічні характеристики зразків.

2.1. Об'єкт дослідження та методика проведення експерименту

В якості об'єкту дослідження були взяті двовимірні полікристалічні зразки алюмінію, які вирізали з алюмінієвої фольги чистотою 99,96%, товщиною 150 мкм. Середній розмір зерен у вихідних зразках Al становив $\sim 0,1$ мм. Дослідження в роботі проводилися на фольгах алюмінію з розміром зерна ~ 3 мм, ~ 8 мм. Такі зразки отримували за допомогою термомеханічної обробки, яка включала:

- а) для зняття напруження проводився первинний відпал за температури 400°C протягом 1 години;
- б) для отримання зразків з різною зеренною структурою попередня деформація за умов одноосного розтягування становила $\sim 2,5\%$ і $\sim 5-6\%$;

- в) первинний рекристалізаційний відпал за температури 300°C протягом 1 години (первинна рекристалізація);
- г) вторинний рекристалізаційний відпал за температури 630°C протягом 2-х годин (збірна рекристалізація).

Після термомеханічної обробки зразки Al піддавалися хімічному травленню за допомогою труйника Келлера (20мл HNO₃, 30мл HCl, 5мл HF, 30млH₂O) з метою виявлення зеренної структури. Зразки розміром 60x32x0,15 мм³ розрізалися навпіл, тобто надалі досліджувалися зразки розміром 60×16×0,15 мм³. Важливо, що кожна пара таких зразків Al мала ідентичну зеренну та дефектну структуру. З кожної пари зразків один залишався для дослідження без покриття, а на інший зразок з цієї пари наносили з нітриду титану. Нанесення покриття здійснювалося наступним чином. На підготовлені зразки після попереднього іонного очищення наносили всебічне одношарове покриття з нітриду титану товщиною ~ 3 мкм на установці "Булат-3Т". Режим нанесення покриття полягав у такому. Попереднє очищення поверхні зразка здійснювали за умови: I_д = 75 А, U_{вч} = 600 В; після іонного очищення на початку протягом 1 хвилини проводили осадження α-Ti; потім осадження нітриду титану здійснювали в такому режимі: I_д = 75А, U_в = 1кВ протягом 30 с. Тиск азоту в камері становив 2×10⁻¹ Па.

Механічні випробування всіх зразків проводилися в умовах одноосного активного розтягування зі швидкістю деформації $\dot{\epsilon} \approx 5 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ на спеціальному деформувальному пристрої, розробленому на кафедрі ФТТ (рис.10 [1]). У процесі деформації автоматично записувалася діаграма деформації (деформаційна крива в координатах "напруження - деформація" ($\sigma = f(\epsilon)$)) з використанням цифрового мультиметра (Nnit-T UT70D), з'єданого з ПК. Усі зразки в процесі випробування доводилися до руйнування.

Мікроструктуру поверхні зразків досліджували за допомогою оптичного мікроскопу (МІМ-8) та растрового мікроскопу (Jeol JSM - 840 при значенні прискорювального напруження 20kV).

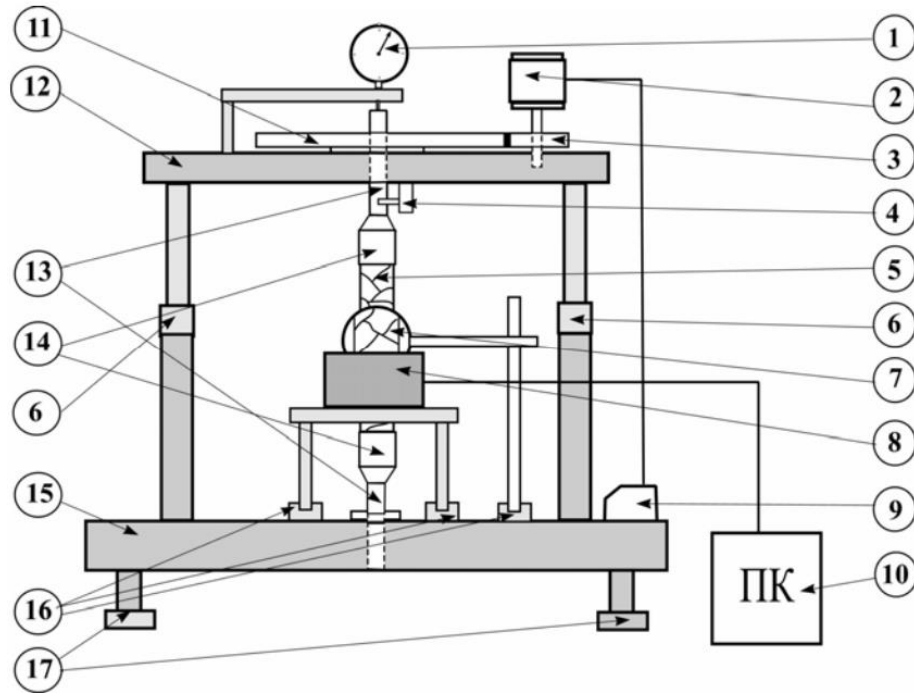


Рис.10. Схема установки для деформування зразків: 1 - індикатор годинного типу; 2 - електричний реверсивний двигун; 3, 11 - провідна і ведена шестирні; 4 - стопорний гвинт; 5 - зразок; 6 - опори; 7 - система лінз; 8 - відеокамера; 9 - перемикач; 10 - ПК; 12, 15 - верхня і нижня платформи; 13 - верхня і нижня тяги; 14 – затискачі для кріплення зразка; 16 - направляючі для переміщення столика і пристрою для фокусування; 17 - стійки для регулювання рівня[1]

2.2. Експериментальні результати та їх обговорення

2.2.а. Деформаційні криві для зразків фольг алюмінію з різним розміром зерна без покриття та зі всебічним поверхневим покриттям із нітриду титана

Попередні експериментальні дослідження закономірностей та механізмів пластичної деформації двовимірних полікристалів Al свідчать, що на механічні властивості таких зразків має суттєвий вплив зеренна структура зразків. У зв'язку з цим в даній роботі досліджувалися однокристалні за товщиною фольги Al із середнім розміром зерна 3 мм і 8 мм зі всебічним покриттям з нітриду титану, товщиною ~ 3 мкм, які деформувалися за умов одноосного розтягування. Аналогічні дослідження проводилися **на зразках – двійниках** з однаковою дефектною структурою без покриття. Порівняльний аналіз експериментальних даних дозволяє зробити висновки щодо впливу наявності покриття з нітриду титана на механічні властивості досліджуваних зразків.

Як приклад, на рисунках 11 і 12 наведено експериментально отримані *деформаційні криві для кожної пари зразків Al з різним розміром зерна без покриття та з покриттям із нітриду титану*. На цих же рисунках для кожної пари зразків із різним розміром зерна наведені мікрофотографії досліджуваних зразків до і після деформування. Аналізуючи хід деформаційних кривих для всіх зразків Al з покриттям і без нього, можна зробити наступний висновок: *всі криві мають певний стадійний характер, але спостерігається суттєва відмінність ходу деформаційних кривих на початкових стадіях пластичної деформації, який характеризується особливою зміною коефіцієнта деформаційного зміцнення. Добре видно, що наявність покриття призводить до істотного зниження*

пластичності зразків і практично не впливає на границю міцності. Кількісні оцінки будуть надані нижче.

Розглянемо деформаційні криві для зразків фольг Al з різним розміром зерна без покриття і з покриттям. На рисунку 13 приведені деформаційні криві для зразків фольг Al з різним розміром зерна без покриття. На рисунку 14 для порівняння приведені деформаційні криві, які отримано для зразків фольг Al з різним розміром зерна з покриттям з нітриду титану.

Видно, що наявність покриття суттєво - практично вдвічі зменшує пластичність як дрібнокристалічних, так і крупно кристалічних зразків.

В розділі 2.2 в обговоримо причини впливу наявності покриття із нітриду титану на зміну характеристик міцності та пластичності досліджуваних зразків.

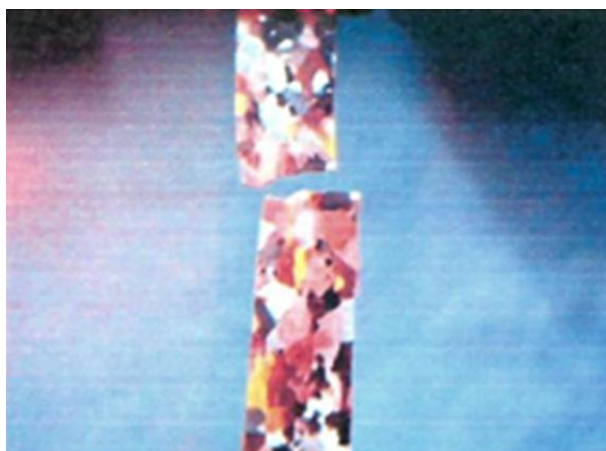
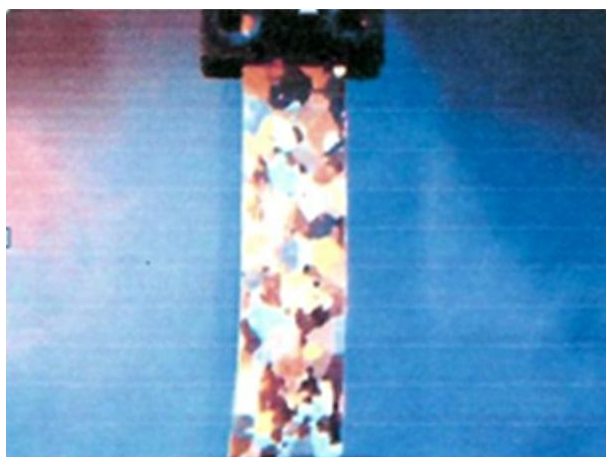
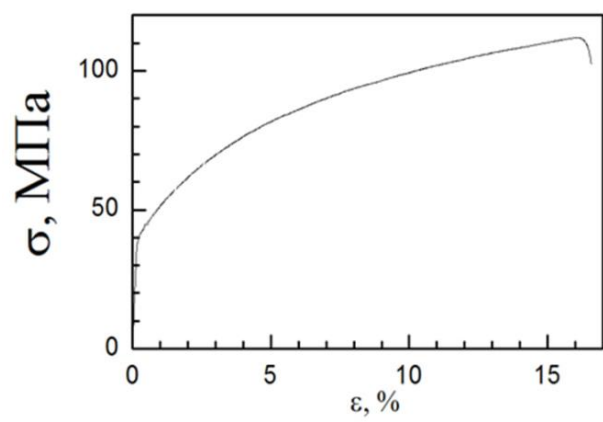
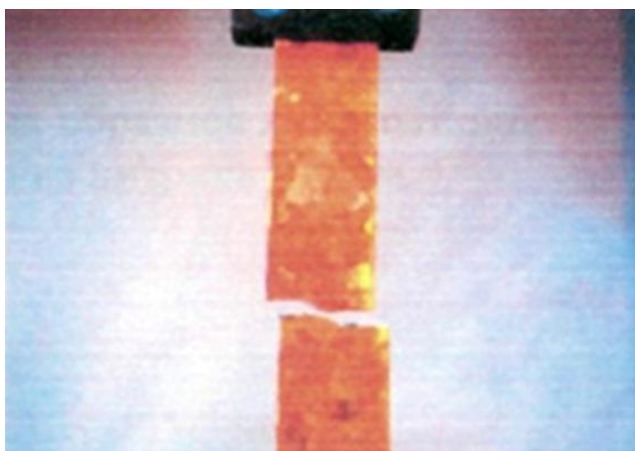
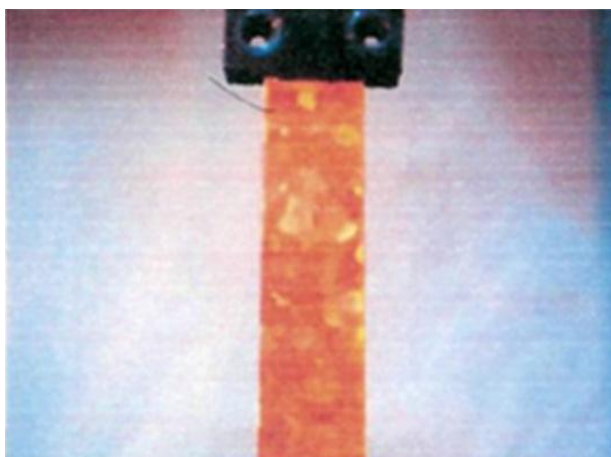
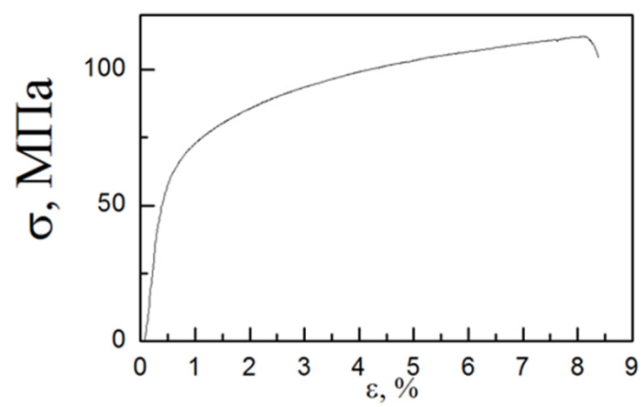
Al**a****Al+TiN****б**

Рис. 11. Деформаційні криві для зразків фольг Al з $d = 3$ мм і мікрофотографії досліджуваних зразків до і після випробування; а - без покриття; б - з покриттям із нітриду титану.

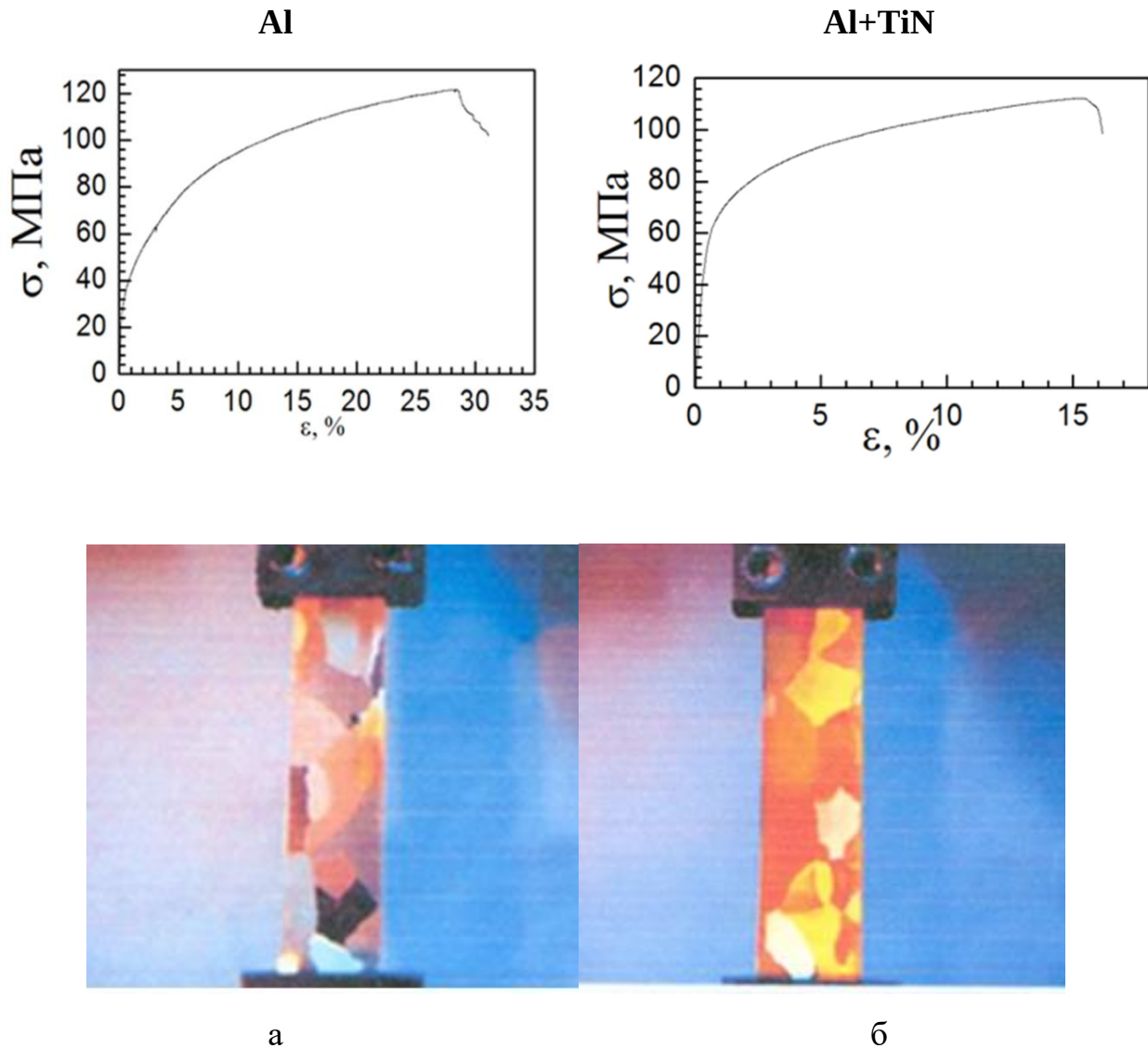


Рис.12. Деформаційні криві для зразків фольг Al з $d = 8$ мм і мікрофотографії досліджуваних зразків до випробування; а – без покриття; б - з покриттям із нітриду титану.

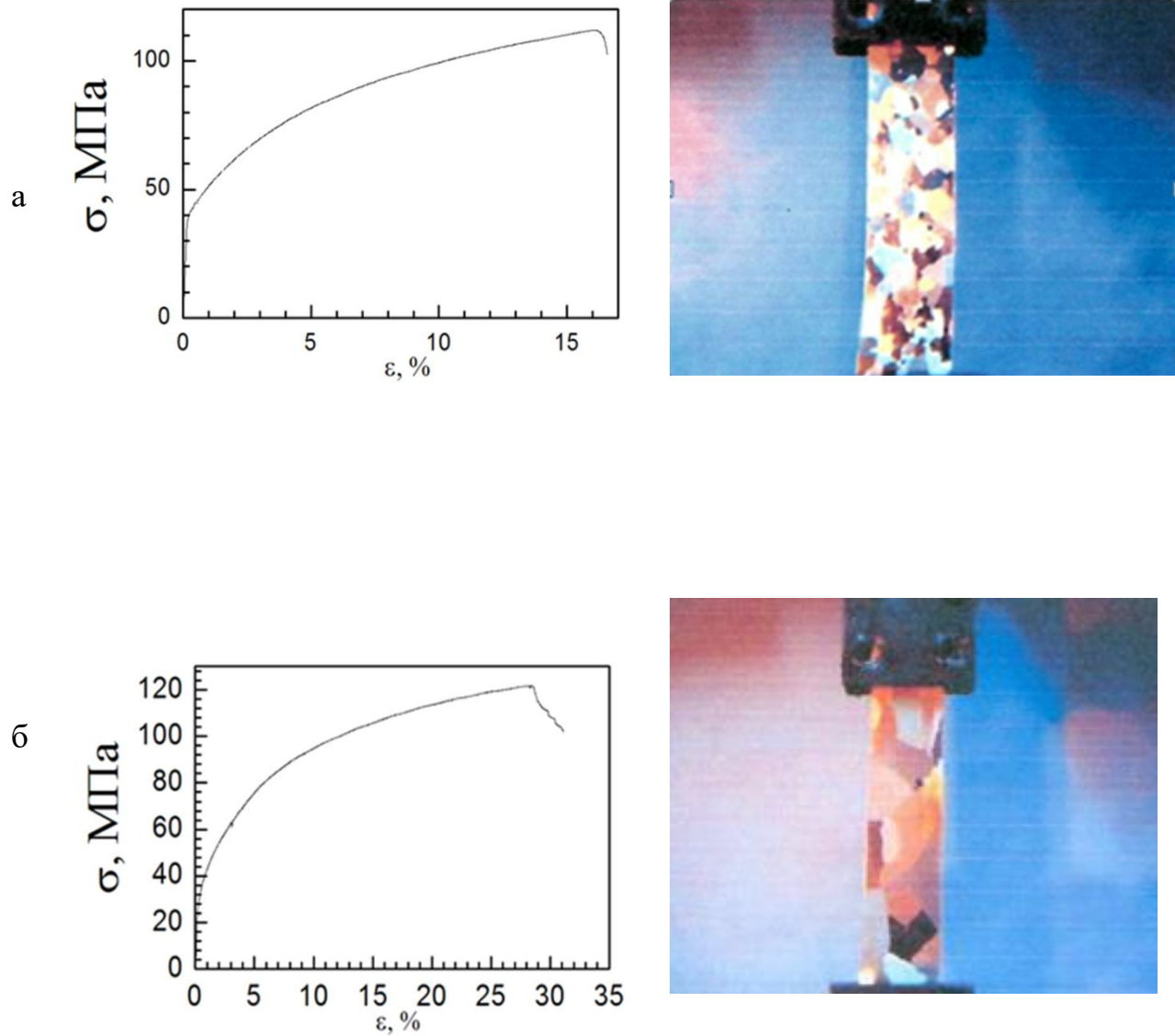


Рис. 13. Деформаційні криві для зразків фольги Al з різним розміром зерна без покриття та відповіді мікрофотографії досліджуваних зразків: а - $d \approx 3$ мм; б - $d \approx 8$ мм.

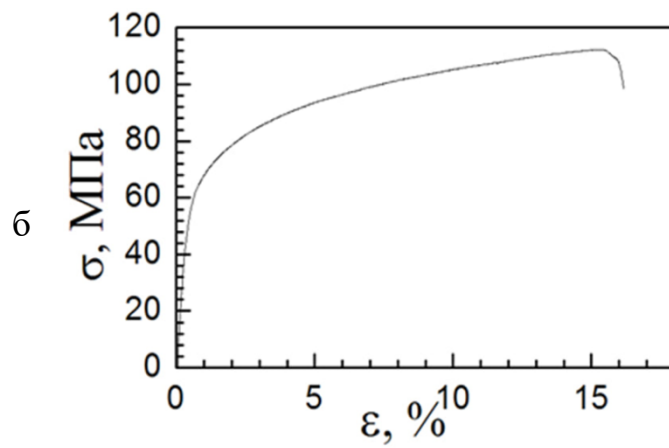
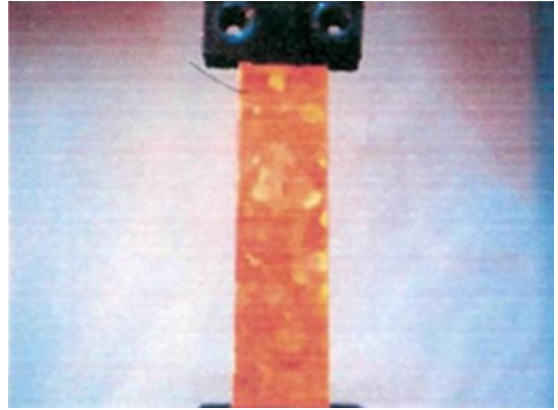
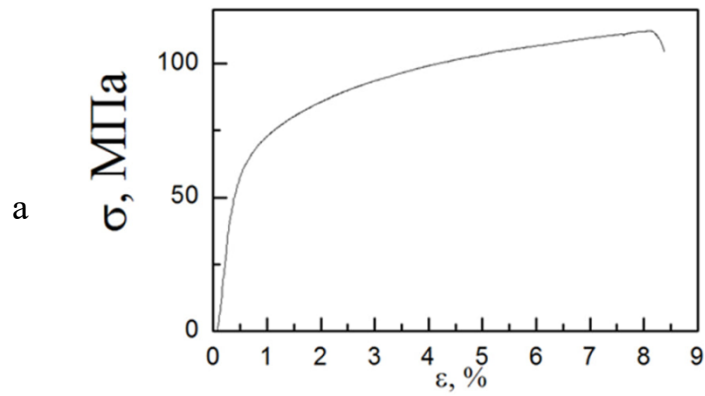


Рис. 14 . Деформаційні криві для зразків фольги Al з різним розміром зерна зі всебічним покриттям із нітриду титану та відповіді мікрофотографії досліджуваних зразків: а - $d \approx 3 \mu\text{m}$; б - $d \approx 8 \mu\text{m}$.

2.2.6. Деформаційне зміцнення зразків, що досліджувалися. Мікроструктура поверхні зразків фольг алюмінію з поверхневим покриттям із нітриду титана після деформування.

Аналізуючи хід деформаційних кривих, які отримано для досліджуваних зразків без покриття та з покриттям із нітриду титана, зокрема, наведених на рисунках 11 і 12, можна зробити певні висновки. Загальним є таке. Деформаційні криві для зразків алюмінію з різним розміром зерна без покриття та з покриттям із нітриду титану мають однакову стадійність: за лінійною ділянкою на деформаційній кривій, яка відповідає за пружну деформування, слідує перехідна ділянка (для зразків із покриттям - близька до параболічної залежності), а далі спостерігається завершальна стадія зі змінним коефіцієнтом деформаційного зміцнення. Однак *хід деформаційних кривих, що визначає розвиток пластичної деформації в перехідній ділянці для зразків без покриття та з покриттям із нітриду титану, істотно відрізняється*. Це свідчить про різний характер зміни коефіцієнта деформаційного зміцнення в таких зразках. Для зразків алюмінію з покриттям значення коефіцієнта деформаційного зміцнення за різної деформації в межах (0 - 4) % істотно вищі, ніж для зразків без покриття. Це проілюстровано на рисунку 15.

Відомо, що закономірність розвитку пластичної деформації та величина коефіцієнта деформаційного зміцнення для різних ступенів деформації визначаються дефектною структурою зразків, типом субструктури та зеренною структурою. *Деформаційне зміцнення переважно визначається густиною дислокацій, взаємодією гратчастих дислокацій з зерно-граничними дислокаціями на границях зерен та інших границь розділу в об'ємі зразка.*

Оскільки досліджені зразки Al мали однакову вихідну зеренну та дефектну структуру, то *відмінність у ході деформаційних кривих та у змінненні величини*

коефіцієнта деформаційного зміцнення на початковому етапі пластичного деформування зумовлена лише наявністю всебічного поверхневого покриття з нітриду титану. На цьому етапі деформування покриття представляє собою суцільний шар (як встановлено експериментально) і відіграє зміцнювальну роль, мабуть, завдяки блокуванню виходу дислокацій на поверхню зразка, що призводить до істотного збільшення густини дислокацій в об'ємі зразка і, як наслідок, до збільшення величини коефіцієнта деформаційного зміцнення на даному етапі деформування.

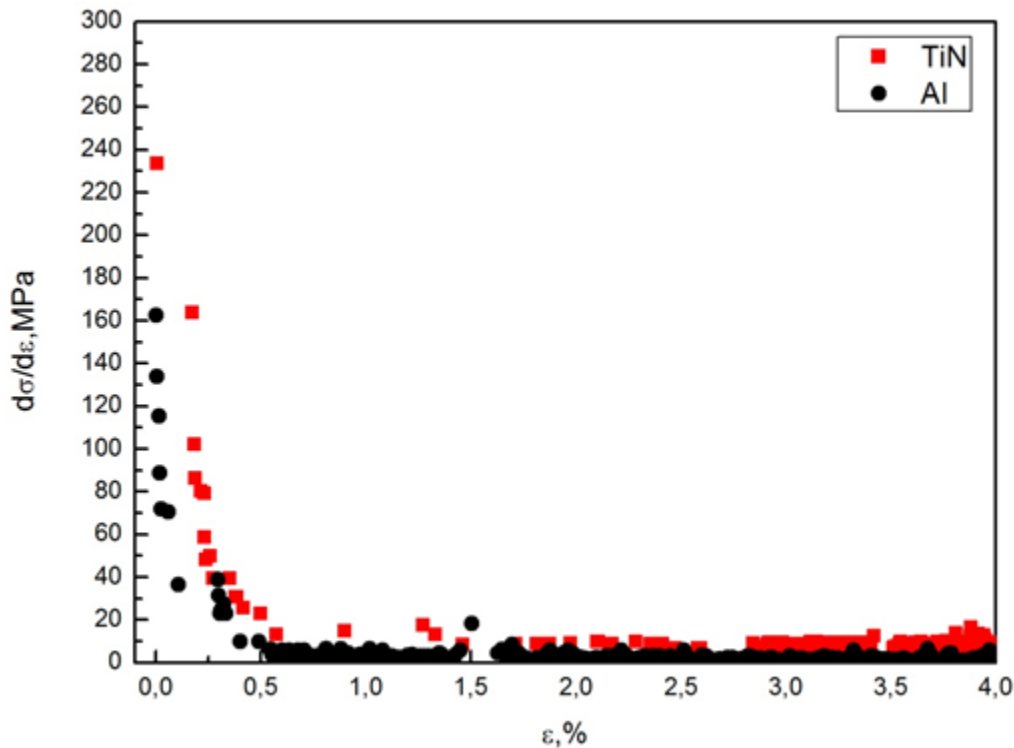


Рис. 15. Залежність коефіцієнта деформаційного зміцнення від деформації для зразків Al без покриття і з покриттям з нітриду титану на перехідній стадії деформування.

При подальшому збільшенні деформації зразків з покриттям, як показали експериментальні результати, відбувається порушення суцільності шару з нітриду титану. Відомо, що покриття з нітриду титану є більш жорстким і має більш високий модуль пружності, ніж матеріал основи, в результаті чого буде суттєво впливати на формування мезомасштабних рівней деформації. При досягненні деформації зразка 3 - 4 % починається розтріскування поверхневого шару із нітриду титану товщиною ≈ 3 мкм при збереженні суцільності основи з алюмінію. Тріщини в поверхневому шарі виникають у напрямку, перпендикулярному до напрямку розтягування зразка, а зі збільшенням деформації зразка щільність тріщин зростає. І, як наслідок, покриття з нітриду титану на зразках Al на цій стадії пластичної деформації перестає відігравати зміцнювальну роль. Хід деформаційних кривих при збільшенні ступеню деформації і до завершальної стадії деформування для зразків Al без покриття та з покриттям характеризуються близькими за величиною коефіцієнтами деформаційного зміцнення.

На рисунках 16 і 17 наведені мікрофотографії поверхні досліджених зразків Al з покриттям із нітриду титану. Мікрофотографії отримано для зразків Al за різної величини деформації в оптичному (рис. 16) і растровому (рис. 17) мікроскопах.

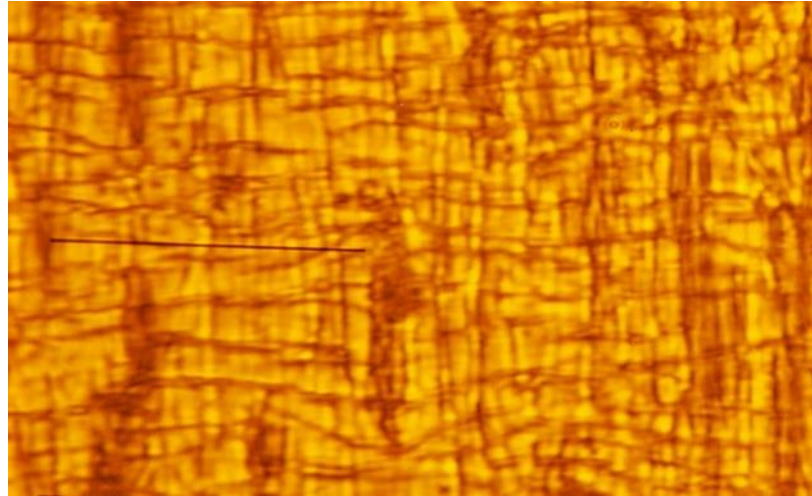
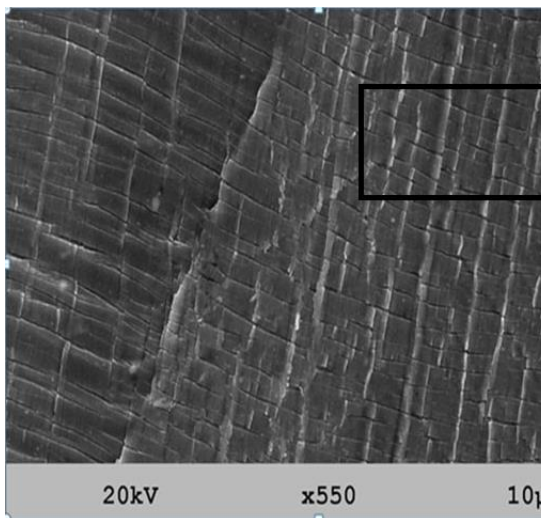
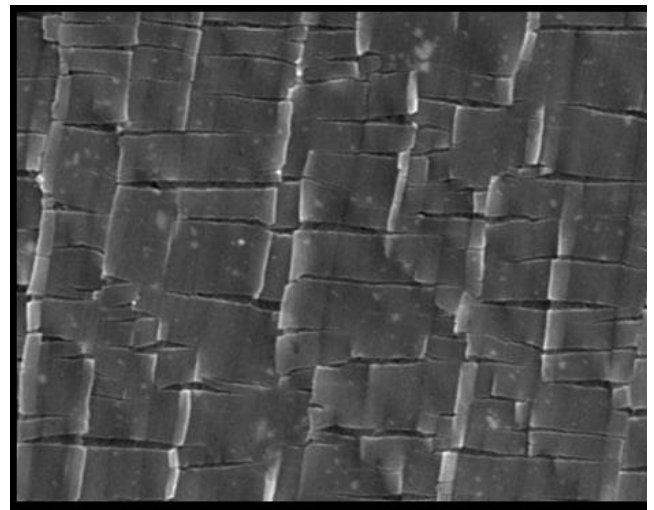


Рис. 16. Мікрофотографія поверхні зразка Al з покриттям із нітриду титану після деформування зразка на 6 % ($\times 70$).



а



б

Рис. 17. Мікрофотографія поверхні зразка Al з покриттям із нітриду титану після деформування зразка на $\epsilon = 8\%$, які отримано в растровому мікроскопі(а), збільшене зображення (б)

Експериментальні результати свідчать, що характер розтріскування покриття з нітриду титану на різних стадіях деформування зразка різний, а саме: зі

збільшенням величини деформації зразка щільність тріщин у поверхневому шарі з нітриду титану зростає.

2.2.в. Механічні характеристики зразків фольг алюмінію з покриттям із нітриду титану і без нього

Отримані в роботі експериментальні результати дають змогу визначити характеристики міцності: умовну границю плинності $\sigma_{0,2}$, границю міцності σ_B (тимчасовий опір), і пластичність - максимальну деформацію зразків ϵ_{max} перед руйнуванням. За деформаційними кривими, наведеними на рисунках 11 та 12, які отримано для двовимірних зразків фольг Al, товщиною 150 мкм, з різним розміром зерна (3 мм і 8 мм) без покриття і з покриттям з нітриду титану, товщиною ≈ 3 мкм, визначалися перераховані вище механічні характеристики зразків, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 Механічні характеристики для зразків Al з різним розміром зерна без покриття і з покриттям із нітриду титану, товщиною ~ 3 мкм.

Матеріал	d , мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ϵ_{max} , %
Al	3	42	110	16
Al+TiN	3	58	113	8
Al	8	30	118	29
Al+TiN	8	58	112	16

Із таблиці 1 видно, що для дрібно зернистих зразків без покриття величина умовної границі плинності $\sigma_{0,2}$ більша, ніж для крупно кристалічних, як і передбачає закон Холла-Петча [3].

Із таблиці 1 випливає, що наявність всебічного покриття з нітриду титану (товщина ~ 3 мкм) суттєво підвищує умовну границю плинності $\sigma_{0,2}$ для всіх досліджуваних зразків незалежно від вихідної зеренної структури Al. Саме такий результат є підтвердженням висновку, що переважним фактором, який впливає на величину умовної границі плинності $\sigma_{0,2}$ на перехідній стадії пластичної деформації є наявність всебічного покриття з нітриду титану на поверхні фольг Al, яке ще зберігає свою суцільність і відіграє зміцнювальну роль. А з цього випливає, що напруження, необхідне для початку пластичної деформації в двовимірних зразках, що досліджуються, де вплив поверхні значно зростає у порівнянні з тривимірними зразками, збільшується завдяки наявності всебічного поверхневого покриття, яке додатково блокує дислокаційне ковзання.

Величина границі міцності σ_b для всіх досліджених зразків фольг Al з різним розміром зерна без покриття залишається приблизно однаковою. Крім того експериментально не виявлено впливу зміни розміру зерна у зазначеному інтервалі на величину границі міцності в досліджених зразках. В роботі [19] показано, що на міцність полікристалів істотно впливає накопичення граткових дислокацій біля границь зерен у процесі пластичної деформації. Очевидно, незалежність границі міцності зразків Al за зміни середнього розміру зерна від 3 до 8 мм обумовлена розмірним фактором: досліджувані зразки фольг Al є двовимірні з наскрізними границями зерен. Збільшення протяжності границь зерен в цих зразках не призводить до помітної зміни характеру накопичення гратчастих дислокацій біля границь зерен у зразку.

Величина границі міцності σ_b для всіх досліджених зразків фольг Al з різним розміром зерна з наявністю всебічного покриття з нітриду титану, товщиною 3 мкм, залишається приблизно такою, як і для зразків без покриття..

Такий результат може свідчити про те, що покриття з нітриду титану зазначеної товщини призводить до підвищення границі міцності зразків Al через двовимірність підкладки, малу товщину покриття і втрату суцільності покриття вже після першої стадії розвитку пластичної деформації.

Як впливає з таблиці 1, характеристика пластичності - $\epsilon_{\max}$ чутлива до зміни розміру зерна в зразках Al. Величина $\epsilon_{\max}$ зростає у зразках Al без покриття зі збільшенням розміру зерна (див. таблицю). Враховуючи, що пластичність зразків обумовлена розвитком релаксаційних процесів, а саме, дислокаційним ковзанням і розвитком ротаційних процесів, то можна припустити, що їх співвідношення, повнота перебігу і внесок у пластичність зразків буде залежати від протяжності границь зерен, якщо навіть не зважати на структуру границь. Бо саме на границях зерен треба узгоджувати процеси для збереження суцільності зразків. Зі збільшенням протяжності границь зерен збільшується ймовірність утруднення в протіканні цих механізмів релаксації концентраторів напруження, що призводить до ще одного способу релаксації - до руйнування. Як результат: збільшення протяжності границь зерен у дрібнокристалічних зразках призводить до істотного гальмування дислокаційного ковзання на границях, що і призводить до зниження пластичності зразків.

Наявність всебічного покриття з нітриду титану на зразках Al з розміром зерна 3 мм, 8 мм суттєво впливає на пластичність зразків: знижує ресурс пластичності досліджених зразків. Для всіх зразків Al з покриттям з нітриду титану $\epsilon_{\max}$ знижується практично **вдвічі** (див. таблицю). Очевидно, поверхневий шар із нітриду титану навіть після розтріскування шару блокує або гальмує розвиток як дислокаційного ковзання, так і розвиток ротаційної моди пластичної деформації алюмінієвих зразків. У зв'язку з цим релаксаційні процеси

будуть загальмовані і процес руйнування настає раніше, ніж у зразках Al без покриття.

Таким чином, встановлено, **як наявність всебічного поверхневого покриття з нітриду титану на двовимірних зразках Al, що мають однакову вихідну дефектну структуру, змінює низку механічних характеристик міцності та пластичності досліджуваних зразків.**

ВИСНОВКИ

1. Експериментально досліджені закономірності розвитку пластичної деформації зразків фольги Al, товщиною 150 мкм з різним розміром зерна (3 мм і 8 мм) без покриття та зі всебічним покриттям із нітриду титану, товщиною ~ 3 мкм.

2. Встановлено, що наявність всебічного поверхневого покриття з нітриду титану на двовимірних зразках фольги Al, що мають однакову вихідну дефектну структуру, змінює механічні характеристики міцності та пластичності досліджених зразків, а саме:

- спостерігається суттєве підвищення умовної границі плинності $\sigma_{0,2}$ та значне підвищення коефіцієнта деформаційного зміцнення на початковій стадії пластичної деформації;
- практично не впливає на величину границі міцності σ_b (тимчасового опору) незалежно від величини розміру зерна;
- призводить до зниження максимальної деформації ϵ_{max} зразків фольги Al практично вдвічі.

3. Отримані експериментальні результати дозволяють зробити висновок, що всебічне поверхневе покриття з нітриду титану, товщиною ~ 3 мкм, на двовимірних зразках фольги Al, товщиною 150 мкм, є **зміцнювальним покриттям** тільки на початковій (перехідній) стадії пластичної деформації в цих зразках.

Список використаної літератури

1. Бадіян Є.Ю., Тонкопряд А.Г., Шеховцов О.В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізичного матеріалознавства: 1. Вивчення пластичної деформації та визначення механічних характеристик металів і сплавів. 2. Вирощування монокристалів. - Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2007, - с. 3-17.
2. Honicombe R. Plastic deformation of metals. M.Mir.1972, – 408 p.
3. Зиман З.З., Сіренко А.Ф.. Основи фізичного матеріалознавства: Навчальний посібник. – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2005. – 288 с.
4. Кшнякин. В. С., Опанасюк А. С., Дядюра К. О. Основи фізичного матеріалознавства: Навчальний посібник. – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 466 с.
5. Ratajski, Jerzy, and Tomasz Suszko. Modelling of the nitriding process. - Journal of materials processing technology, 195.1-3, 2008, - p. 212-217.
6. Zheng, W. T., Chang Q. Sun. Electronic process of nitriding: Mechanism and applications. - Progress in solid state chemistry, 34.1, 2006, - p. 1-20.
7. Marinin V.G. Effects of Surface Treatment on the Cavitation Erosion of High-Chrome Steel, Zirconium, Titanium and Their Alloys. - Proceedings special symposium on Erosion and Corrosion of Nuclear Power Plant Materials organized by the International Atomic Energy Agency in Kiev, 19-22 Sept., 1994, IWGLMNPP - 94/8. Reproduced by the IAEA, Vienna, Austria, 1994, - p. 163-167.
8. Fewell, M. P. Nitriding at low temperature. - Surface and Coatings Technology, 131.1-3, 2000, - p. 284-290.

9. Cavaliere, P., Giorgio Zavarise, and M. Perillo. Modeling of the carburizing and nitriding processes. - Computational Materials Science , 46.1, 2009, - p. 26-35.
10. Ozhigov L.S., Belous V.A., Savchenko V.I., Nosov G.I., Ovcharenko V.D., Tolmachova G.N., Kuprin A.S., Goltvyanitsa V.S. Role of surface layer Nanostructuring in improving mechanical and corrosion properties of reactor materials - ISSN 1562-6016. PAST. 2017. №2(108), - p. 168-172.
11. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О., Федоренко Є. П.. Лазерна поверхнева обробка матеріалів : монографія - ХНУРЕ, 2020, – 100 с.
12. Мажейка А. И., Чайковський О. Б., Аль-Шара Мотаз Мухаммед, Лутай А. М.. Лазерне термодетонаційне зміцнення деталей сільськогосподарських машин. - Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. - Кіровоград: КНТУ, вип. 36, 2006. - С. 140-146.
13. Лалазарова Н.О., Мачан О.В., Афанасьєва І.С. Лазерне зміцнення деталей паливної апаратури - Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії: збірник тез доповідей міжнародної конференції, 11–12 березня 2024 року. – Харків: ФОП Бровін ОВ, 2024. – С. 49-50.
14. Сердітов О., Скляр А., Кір'янова К.. Дифузійна металізація сталі і чавуну карбідоутворюючими елементами. - Матеріали науково-технічної конференції "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта" XIX , 2018. - С. 80-81.
15. Швець, В. Т.; Козицький, С. В. Металізація водню та гелію. - Одес. нац. морська акад., Одес. нац. акад. харч. технологій. - Одеса : ОНМА, 2013. - С.97-106.

16. Таращук, П. Активована дугова металізація. - Збірник тез VIII всеукраїнської студентської науково-технічної конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» , 2015, - с. 261-261.
17. Wang, Chao. Microstructure and wear performance of Ni-10 wt.% Al coatings plasma sprayed on Ni-based superalloys with a sound field. - Surface and Coatings Technology, 370, 2019, - p. 157-162.
18. Моравський В. С., Тимків І. А., Боднарчук П. Т.. Металізація полівінілхлоридного пластикату хімічним відновленням у розчинах. – Нац. Університет «Львівська політехніка», Львів, 2016, - с. 405-409.
19. Danilenko V.N., Bachurin D.V., Mulyukov R.R.. In-situ measurements of grain rotation during annealing in ultrafine grained aluminium alloy. - Letters on materials, V. 4, №4, 2014, – P. 233 – 236.