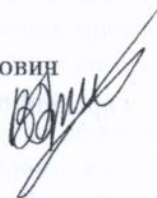


На правах рукопису

БРЮХОВЕЦЬКИЙ Василь Володимирович



ДИНАМІКА РОЗВИТКУ ПОРИСТОСТІ
В СПЛАВАХ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ В УМОВАХ
СТРУКТУРНОЇ НАДПЛАСТИЧНОСТІ

01.04.07 – Фізика твердого тіла

05.16.01 – *Металознавство та
Термізна обробка
металів*

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук



00752167 (S)

Дисертація є рукописом.

Дисертація виконана у Харківському державному університеті.

Науковий керівник: доктор фіз.-мат. наук, професор
Кузнецова Раїса Іванівна.

Офіційні опоненти: доктор фіз.-мат. наук, професор
Неклюдов Іван Матвійович
(ННЦ Харківський фізико-технічний
інститут);

доктор фіз.-мат. наук, професор
Андронов Володимир Михайлович
(Харківський державний університет).

Провідна установа: Харківський державний політехнічний
університет, м. Харків.

Захист відбудеться "11" *квітня* 1997 р. о *16⁰⁰* годині
на засіданні спеціалізованої ради Д 02.02.15 у Харківському
державному університеті (310077, м. Харків, пл. Свободи, 4,
ауд. ім. К.Д. Синельнікова).

З дисертацією можна ознайомитися у Центральній науковій
бібліотеці ХДУ.

Автореферат розіслано "6" *березня* 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

В.П. Пойда

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми та ступінь дослідження тематики дисертації. Ефективним способом вирішення проблеми значного збільшення ресурсу пластичності металевих матеріалів може бути їх переведення в надпластичний (НП) стан. У цьому стані пластичність збільшується у сотні і тисячі разів, а опір деформуванню значно знижується. Реалізація ефекту надпластичності (НП) в технологічних процесах обробки конструкційних металевих матеріалів дозволяє отримувати деталі досить складної форми при значному зменшенні трудомісткості та енергомісткості операцій, а також суттєво збільшити коефіцієнт використання матеріалу. Проте для широкого впровадження ефекту НП в металообробку бракує знань про його фізичну природу. Тому їх поглиблення є вельми актуальним.

Дослідження, які проведені у даній роботі, стосуються проблем структурної надпластичності (СНП), котра найбільш яскраво виявляється в ультрадрібнозернистих (УДЗ) матеріалах. В літературних джерелах вже накопичено значний експериментальний матеріал з різноманітних аспектів СНП, однак ряд закономірностей і фактів, отриманих при вивченні цього ефекту, залишаються до цього часу неоднозначно тлумаченими. Перш за все це стосується особливостей структурного стану НП матеріалів, однією з характеристик якого є зерномежева пористість. Уявлення про те, що зерномежева пора є структурним елементом, необхідним для здійснення позеренного масопереносу в умовах СНП, вже підтвержені експериментальними дослідженнями, проведеними на крупнокристалічних об'єктах, однак для УДЗ матеріалів така ж роль пористості поки що не є остаточно визнаною фахівцями. Дискусійним є і питання щодо механізмів розвитку зерномежевої пористості в ході надпластичної деформації (НПД). Різноманітні матеріали виявляють різну схильність до поротворення в умовах НПД. Ці факти поки що не знайшли однозначного пояснення. Вплив пористості з різною морфологією на розвиток деформаційних процесів в умовах СНП до цього часу детально ще не вивчався.

Мета та основні задачі дослідження. Мета роботи полягала в дослідженні закономірностей розвитку і накопичення зерномежевої пористості в ході НПД УДЗ сплавів на основі алюмінію та вивченні її впливу на процеси НПД.

У зв'язку з цим у роботі були поставлені такі задачі:

- провести механічні випробування УДЗ складнолегованих алюмінієво-літєвих сплавів 1421, 1423, 1450 з метою встановлення оптимальних температурно-швидкісних умов виявлення ефекту НП в них;
- виконати структурні дослідження, спрямовані на з'ясування морфологічних особливостей пористої структури, а також вивчити процеси накопичення пористості різної морфології в ході НПД в оптимальних умовах СНП досліджуваних сплавів 1421, 1423, 1450;
- розробити методику вивчення механізмів розвитку пор під час НПД та вивчити ці механізми для сплавів на основі алюмінію з різним розміром зерна;
- встановити зв'язок між механізмами розвитку пористості в умовах СНП та механізмами НПД.

Наукова новизна. Вперше реалізована СНП УДЗ складнолегованих алюмінієво-літєвих сплавів 1421, 1423, 1450 при деформуванні зразків з них розтягом на повітрі в режимі повзучості при сталому напруженні та встановлені температурно-швидкісні умови її виявлення. Показано, що НПД цих сплавів здійснюється при наявності в них зерномежевої пористості та за її участю в деформаційних процесах.

Експериментально отримані закономірності розвитку зерномежевої пористості різної морфології у вказаних сплавах в ході НПД. Показано, що накопичення пористості обумовлене, головним чином, збільшенням об'єму пор-комплексів. Установлено, що об'єм індивідуальних пор під час НПД при наявності пор-комплексів утримується на постійному рівні, який складає 3 – 6% в залежності від марки сплаву, що відповідає рівню, обґрунтованому у теоретичній моделі [1, 2].

Розвинуто методику кількісного вивчення механізмів росту і заліковування зерномежевих пор з різною морфологією, яка ґрунтується на обробці даних вимірювання внесків різних видів деформації в зміну форми та розмірів пор. Використання цієї методики дозволило встановити, що в умовах НПД індивідуальні зерномежеві пори ростуть, головним чином, завдяки зерномежевому проковзуванню (ЗМП), а пори-комплекси – завдяки внутрішньозерновій деформації (ВД). Встановлено, що тільки індивідуальні зерномежеві пори можуть частково заліковуватися в ході НПД завдяки ЗМП.

Показано, що з наявністю зерномежевої пористості пов'язана локальна неоднорідність НПД, яка зумовлена тим, що поблизу індивідуальних пор серед механізмів деформації переважає ЗМП, а по-

близу пор-комплексів – ВД, внески яких в загальну локальну деформацію суттєво відрізняються від середніх по зразку.

Доведено деформаційну природу розвитку зерномежевих пор в умовах НПД. Показано, що розвиток пористості за цих умов здійснюється за тими ж механізмами, що і сама НПД. Встановлено, що закономірності НПД, росту та заліковування пор в умовах СНП є однотиповими для досліджених сплавів – як з крупним, так і з дрібним розміром зерна.

Вперше спостережена високошвидкісна НП в крупнокристалічному сплаві Al – 4 мас.% Cu.

На захист виносяться наступні наукові результати і положення:

1. Результати механічних випробувань, які дозволили встановити температурно-швидкісні умови виявлення СНП складнолегованих алюмінієво-літєвих сплавів 1421, 1423, 1450.

2. Особливості розвитку зерномежевих пор з різною морфологією – індивідуальних пор та пор-комплексів – в оптимальних умовах НПД цих сплавів.

3. Методика вивчення механізмів росту та заліковування зерномежевих пор в умовах СНП.

4. Уявлення про механізми розвитку, росту та заліковування, зерномежевих пор в умовах СНП в сплавах Al – 4 мас.% Cu, Al – 4,1 мас.% Cu – 0,5 мас.% Zr, 1201 з суттєво різним розміром зерна.

5. Результати експериментальних досліджень, які дозволили встановити локальну неоднорідність НПД, пов'язану з наявністю в сплавах Al – 4 мас.% Cu, Al – 4,1 мас.% Cu – 0,5 мас.% Zr, 1201 зерномежевої пористості.

6. Експериментальне підтвердження деформаційної природи розвитку зерномежевих пор у зразках сплавів Al – 4 мас.% Cu, Al – 4,1 мас.% Cu – 0,5 мас.% Zr, 1201 в ході НПД.

Практична цінність роботи полягає в тому, що отримані в ній результати розширюють уявлення про фізичну природу СНП і є вагомими для подальшого розвитку її теорії. Встановлені температурно-швидкісні умови виявлення ефекту СНП промислових УДЗ сплавів 1421, 1423, 1450 можуть бути використані при розробці і оптимізації технологій їх металообробки в НП стані. Уявлення про механізми розвитку пористості в ході НПД, а також дані про процеси накопичення пористості в досліджених НП сплавах на основі алюмінію з різним розміром зерен є важливими для розробки нових технологій, які базуються на використанні ефекту СНП.

Дисертацію виконано на кафедрі фізики твердого тіла Харківського держуніверситету.

Особистий внесок здобувача полягає у тому, що він отримав представлені в роботі експериментальні результати. Він приймав участь у розробці методики визначення механізмів розвитку пор в умовах СНП та в опрацюванні і обговоренні всіх отриманих результатів. Формулювання положень та висновків роботи, а також підготовка матеріалів до публікації проходили за його безпосередньою участю.

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідались та обговорювались на наступних конференціях та семінарах: I конференція “Физические явления в твердых телах”, ХДУ, Харків – 1993 р.; II Міжнародна школа-семінар “Эволюция дефектных структур в металлах и сплавах”, Барнаул – 1994 р.; I Міжнародна конференція “Актуальные проблемы прочности”, Новгород – 1994 р.; II конференція “Физические явления в твердых телах”, ХДУ, Харків – 1995 р.; XIV Міжнародна конференція “Физика прочности и пластичности материалов”, Самара – 1995 р.; Міжнародна конференція “Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений”, Тамбов – 1996 р.; XXXII семінар “Актуальные проблемы прочности”, Санкт-Петербург – 1996 р.; III Міжнародна школа-семінар “Эволюция дефектных структур в конденсированных средах”, Барнаул – 1996 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 16 праць, у тому числі 4 статті, 3 з яких у наукових фахових виданнях.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається з передмови, п'яти розділів, висновків та списку літератури з 118 найменувань; вона викладена на 134 сторінках, містить 43 рисунки та 5 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В передмові обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета і задачі дослідження, наукова новизна та практична цінність, а також основні наукові результати і положення, які виносяться на захист.

В першому розділі “Літературний огляд” викладені феноменологічні характеристики НП течії, дається опис і обговорюються роботи, в яких досліджувались зеренна та пориста структура надпластично деформованих сплавів на основі алюмінію. Розглянуті сучасні уяв-

лення про механізми НПД та моделі НП течії. Викладені сучасні уявлення щодо механізмів розвитку пористості в ході НПД.

В другому розділі “Постановка задачі і методи дослідження” дається обґрунтування поставлених у роботі задач, вибору об’єктів та методів досліджень і наводиться їх короткий опис. Об’єкти дослідження - промислові конструкційні УДЗ складнолеговані алюмінієво-літєві сплави 1421, 1423, 1450, а також дрібнозернистий модельний сплав Al – 4,1 мас.% Cu – 0,5 мас.% Zr, промисловий конструкційний сплав 1201 і крупнозернистий модельний сплав Al – 4 мас.% Cu.

Механічні випробовування проведені на повітрі в режимі повзучості при сталому напруженні течії σ , що дозволило коректно визначити параметри НП течії і особливості структурного стану досліджених зразків матеріалів. Визначали істинну швидкість деформації $\dot{\epsilon}$ на різних етапах повзучості та середню істинну швидкість деформації $\bar{\dot{\epsilon}}$. Показник чутливості напруження течії до швидкості деформації m знаходили шляхом диференціювання кривих $\lg \sigma = f(\lg \dot{\epsilon})$.

Структурні дослідження виконані із застосуванням світлової мікроскопії. Межі зерен виявляли хімічним травленням та методом створення деформаційного рельєфу на попередньо відполірованій поверхні зразків. Середній розмір зерен визначали за методом випадкових січних, відносна похибка при цьому не перевищувала 10%.

Динаміку накопичування зерномежевої пористості з різним типом морфології в ході НПД вивчали за методами кількісної металографії при поетапному деформуванні зразків. Для визначення об’ємного вмісту пористості застосовували лінійний метод визначення структурного складу сплаву, використовуючи варіант нерухомого шліфа. Проведення вимірювань не менше ніж 100 лінійних відрізків у досить великому числі полів зору, рівномірно розташованих по площині шліфа в робочій частині зразка, дозволило визначити об’ємний вміст пористості з абсолютною похибкою не більшою ніж $\pm 0,5\%$.

Третій розділ “Надпластичність ультрадрібнозернистих складнолегованих алюмінієво-літєвих сплавів в умовах повзучості” присвячений експериментальному дослідженню температурно-швидкісних умов виявлення ефекту СНП в промислових алюмінієво-літєвих сплавах 1421, 1423, 1450. У цьому розділі наведений опис ефекту високошвидкісної НП, спостереженого для сплаву Al – 4 мас.% Cu.

Механічні випробовування зразків сплавів були проведені в інтервалі температур T 753 – 793 К і напружень течії σ 2,0 – 6,0

МПа. За цих умов досліджені сплави виявили СНП, про що свідчать характерний для СНП хід кривих $\lg \sigma = f(\lg \dot{\epsilon})$, високі значення показника m , немонотонна залежність від σ видовження до зруйнування δ та показника m , які досягають максимального значення в оптимальних умовах НПД, дані про які наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Марка сплаву	T , К	σ , МПа	$\bar{\epsilon}$, c^{-1}	m	δ , %
1421	773	4,0	$6,4 \cdot 10^{-4}$	0,66	530
1423	773	3,5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,44	600
1450	773	4,0	$3,5 \cdot 10^{-4}$	0,51	770

Для всіх досліджених сплавів існує кореляція між максимальним значенням показника m та максимальним видовженням зразків до зруйнування.

Зеренна структура зразків сплавів 1421 і 1450 є УДЗ із середнім розміром зерна \bar{d} 3 – 8 мкм вже у вихідному стані і залишалась такою ж на протязі всієї НПД аж до зруйнування. Зразки сплаву 1423 у вихідному стані мали крупнокристалічну різнозеренну структуру ($\bar{d} = 100$ мкм), котра вже при 100% їх інженерної деформації перетворювалась на УДЗ з \bar{d} 6 – 8 мкм завдяки здійсненню динамічної рекристалізації. Така зміна виду зеренної структури, певно, зумовлювала перехід від високотемпературної повзучості до НПД.

Крупнозернистий сплав Al – 4 мас.% Cu ($\bar{d} = 1$ мм) виявив високошвидкісну НП при деформуванні розтягом в умовах повзучості. Умови виявлення ефекту такі: $\sigma = 5,5$ МПа, $T = 803$ К, $\bar{\epsilon} = 0,5 c^{-1}$, $\delta = 120\%$. Особливості деформаційного рельєфу на поверхні зразків свідчать про те, що в ході високошвидкісної НП здійснюється ЗМП та активне внутрішньозернове дислокаційне ковзання. Останнє, певно, і дає основний внесок у швидкість деформації.

У четвертому розділі “Розвиток зерномежевої пористості в ході надпластичної деформації ультрадрібнозернистих складнолегованих алюмінієво-літєвих сплавів” викладені результати експериментального дослідження особливостей накопичення зерномежевих пор з різною морфологією, а саме індивідуальних пор та пор-комплексів, в ході НП течії сплавів 1450, 1421, 1423 в оптимальних умовах.

Установлено, що в процесі НПД загальний об'єм зерномежевої пористості збільшується при збільшенні ступеня деформації. При цьому накопичення індивідуальних пор та пор-комплексів здійснюється по-різному. На початкових стадіях течії в зразках сплавів

присутні переважно індивідуальні пори, а об'єм пор-комплексів є незначним. В ході НПД об'єм пор-комплексів збільшується, а швидкість його накопичення є близькою до швидкості накопичення загального об'єму пористості. Швидкість же накопичення об'єму індивідуальних пор сповільнюється так, що його величина в зразках сплаву 1421 навіть у момент їх макрозруйнування не перевищує 6%, що близько до того граничного об'єму індивідуальних пор, котрий може бути досягнутий в умовах НПД, як це було розраховано теоретично [2]. У зразках сплаву 1450 об'єм індивідуальних пор, досягнувши при 50% інженерної деформації величини 3,5%, залишається біля цього рівня на протязі всієї наступної деформації. Загальний об'єм зерномежевої пористості у зразках сплаву 1421 у момент їх макрозруйнування значний – 26%, а в зразках сплаву 1450 – 11%.

Для вихідної структури сплаву 1423 є характерною пористість. Вона є локалізованою по межах зерен та в потрійних стиках зерен. Її об'єм становить 2%. В робочій частині зразків цього сплаву, деформованих надпластично до зруйнування, присутні як індивідуальні зерномежеві пори, так і макropорожнини, які витягнуті у напрямку розтягу зразків, а їх розміри перевищують середній розмір зерна в сотні разів. Загальний об'єм пористості в момент зруйнування при деформуванні в оптимальних умовах досягає 30%.

У п'ятому розділі “Локалізація деформації та механізми розвитку пористості в умовах надпластичної течії” викладено розвинуту в роботі методику кількісного вивчення механізмів розвитку – росту та заліковування – зерномежевих пор в ході НПД і приведені дані про локальну неоднорідність НП течії та про механізми розвитку зерномежевих пор під час НПД сплавів Al – 4 мас.% Cu, Al – 4,1 мас.% Cu – 0,5 мас.% Zr, 1201.

Для визначення механізмів росту і заліковування пор виконували оцінки внесків ЗМП і ВД в розвиток пор. Розрахунок внесків ЗМП базується на вимірах зміщень реперних рисок вздож і впоперёк напрямку розтягу на межах зерен, які оточують пору, а внесок ВД розраховували на основі вимірів зміни відстані між реперними рисками в тілі зерен. Ці ж дані використовувались і для визначення внесків ЗМП і ВД у локальну деформацію груп зерен, які оточують пору.

Дослідження виконані для оптимальних умов НПД, дані про які приведені в табл. 2. Там же є і відомості про середній розмір зерна \bar{d} , ступінь деформації ϵ , внесок ЗМП в загальну деформацію $\gamma_{ЗМП}$, об'єм пористості V об'єктів, що досліджувались.

Для структури всіх трьох сплавів характерна наявність в ній індивідуальних зерномежевих пор. Для дрібнозернистого сплаву Al-Cu-Zr поряд з індивідуальними порами спостерігали пори-комплекси.

Таблиця 2

Сплав	T , К	σ , МПа	$\dot{\epsilon}$, с^{-1}	δ , %	d , мкм	ϵ , %	$\gamma_{\text{ЗП}}$, %	V , %	Дже- рело
Al-Cu	803	5,5	$3,5 \cdot 10^{-4}$	220	120	90	50 ± 4	2	[3]
1201	773	4,5	$2,0 \cdot 10^{-5}$	210	22	100	53 ± 8	5	[4]
Al-Cu-Zr	773	5,0	$1,5 \cdot 10^{-4}$	900	10	300	52 ± 10	5	[5]

Виміри і розрахунки були виконані для 20 – 25 індивідуальних пор для кожного із досліджуваних сплавів та для 20 пор комплексів для сплаву Al-Cu-Zr. Вимірювали розмір пор вздовж і впоперек напрямку розтягу (l і b), так само зміну цих розмірів (Δl і Δb), розраховували збільшення довжини пори, яке викликане ЗМП ($X_{\text{ЗМП}}$) та ВД ($X_{\text{ВД}}$), знаходили загальну величину зміни розміру пори $X_{\text{ЗАГ}}$, робили оцінку внесків ЗМП та ВД в рост пори ($\beta_{\text{ЗМП}}$ і $\beta_{\text{ВД}}$) та внесків цих же механізмів у локальну деформацію ділянок, які оточують пору ($\gamma'_{\text{ЗМП}}$ і $\gamma'_{\text{ВД}}$). Знаходили середні значення всіх вимірів. Абсолютна похибка при цьому склала для Δl і Δb не більш $\pm 0,1$ мкм, для $X_{\text{ЗМП}}$, $X_{\text{ВД}}$, $X_{\text{ЗАГ}}$ – відповідно не більш $\pm 0,1$ мкм, $\pm 0,2$ мкм, $\pm 0,3$ мкм. В табл. 3 наведені середні значення деяких із виміряних та розрахованих величин для трьох досліджених сплавів.

Таблиця 3

Сплав	Тип пори	l , мкм	Δl , мкм	Δb , мкм	$X_{\text{ЗМП}}$, мкм	$X_{\text{ВД}}$, мкм	$X_{\text{ЗАГ}}$, мкм	$\beta_{\text{ЗМП}}$, %	$\gamma'_{\text{ЗМП}}$, %
Al-Cu	інд.	65	12,0	-7,8	8,0	3,5	11,5	70	74
1201	інд.	11	2,8	-0,8	2,0	0,7	2,7	74	76
Al-Cu-Zr	інд.	5	1,5	-0,6	1,3	0,4	1,7	76	78
Al-Cu-Zr	п.-к.	37	3,9	+0,4	0,8	2,9	3,7	22	26

Отримані результати свідчать про те, що деформаційні механізми ЗМП і ВД, які діють в локальних ділянках, котрі містять індивідуальні пори та пори-комплекси, суттєво відрізняються. Локальна деформація в ділянках, які містять індивідуальні пори, здійснюється, головном чином, завдяки ЗМП, а його внесок у загальну деформацію $\gamma'_{\text{ЗМП}}$ складає ~ 75%. Середній же по зразку $\gamma_{\text{ЗМП}}$ дорівнює ~ 50%. Біля пор-комплексів ситуація є протилежною. Величина $\gamma'_{\text{ЗМП}}$

в ділянках біля них дорівнює 26%, а це свідчить про те, що деформація в цих ділянках здійснюється, головним чином, завдяки ВД.

Отримані результати ще раз свідчать на користь того, що в умовах НПД індивідуальні зерномежеві пори є тим структурним елементом полікристала, котрий забезпечує здійснення інтенсивних взаємних зміщень зерен шляхом ЗМП і тим самим СНП. Пори-комплекси таку роль не відіграють, однак їх наявність не є перешкодою для розвитку НПД до значних ступенів без макрозруйнування.

Величини $X_{ЗАГ}$, які є розрахунковими значеннями зміни розміру пори завдяки ЗМП і ВД, знаходяться в добрій відповідності з незалежно вимірними змінами розмірів пор вздовж напрямку розтягу Δl . Внески ж ЗМП та ВД в зміну розмірів пор близькі до значень внесків цих же механізмів у локальну деформацію ділянок, які містять пори. $\beta_{ЗМП}$ приблизно дорівнює $\gamma'_{ЗМП}$. Це вказує на те, що ріст пор обох морфологій є деформаційним за природою і що основний внесок в цей процес дають ті ж самі деформаційні механізми, завдяки розвитку яких здійснюється і сама НПД, а саме ЗМП і ВД. При цьому ріст індивідуальних пор здійснюється переважно завдяки ЗМП, а пор-комплексів – завдяки ВД.

Аналіз зміни лінійних розмірів пор впоперек напрямку розтягу Δb вказує на суттєву відмінність в еволюції пор з різною морфологією під час НПД. Значення Δb для індивідуальних пор є від'ємними, а за абсолютною величиною їх можна зіставити з Δl . Це вказує на те, що під час НПД ріст індивідуальних пор супроводжується їх частковим заліковуванням, яке здійснюється, головним чином, завдяки ЗМП. Пори-комплекси в ході НПД збільшують свої розміри в обох напрямках, тобто вони не заліковуються. Процес часткового заліковування індивідуальних зерномежевих пор до деякої міри стримує стрімке накопичення пористості і забезпечує проходження НПД до великих ступенів без передчасного макрозруйнування.

У висновках підсумовані основні результати роботи.

1. Промислові конструкційні УДЗ складнолеговані алюмінієво-літійові сплави 1421, 1423 і 1450 з середніми розмірами зерен 3 – 8 мкм виявили СНП. Максимальні видовження до макрозруйнування перевищують 500% і досягають 770% для зразків сплаву 1450. НПД здійснюється при високій стабільності зеренної структури. Ефективним способом формування УДЗ структури в зразках досліджених сплавів є динамічна рекристалізація, яка здійснюється в ході деформації.

2. Досліджені алюмінієво-літєві сплави в умовах НПД схильні до пороутворення та накопичення пористості. Особливо інтенсивно ці процеси розвиваються в зразках сплавів, які леговані магнієм. При деформуванні в оптимальних умовах СНП вони накопичують пористість, об'єм якої може досягати 30%.

3. Морфологія пористої структури УДЗ алюмінієво-літєвих сплавів, які виявили СНП, однотипна з тією, яку спостерігали раніше і для інших НП сплавів з різноманітними розмірами зерен.

4. Накопичення зерномежевої пористості в ході НПД залежить від типу морфології пористості. Об'єм індивідуальних зерномежевих пор, який вже на початкових етапах деформації складає 3 – 6%, не змінюється аж до макрозруйнування і не перевищує той максимально допустимий рівень, який передбачений теоретичною моделлю НПД за участю зерномежевої пористості. Об'єм пор-комплексів зростає під час НПД. Загальний об'єм пористості досягає найбільшого значення в оптимальних умовах НПД.

5. З метою вивчення механізмів росту і заліковування зерномежевих пор у ході НПД розвинута методика, яка дозволяє робити кількісну оцінку внесків різних видів деформації в розвиток пор. Застосування цієї методики для сплавів з крупним, середнім та дрібним розмірами зерен (Al – 4 мас.% Cu, 1201, Al – 4,1 мас.% Cu – 0,5 мас.% Zr) дозволило встановити механізми розвитку зерномежевих пор з різною морфологією в умовах НП течії.

6. Індивідуальні зерномежеві пори в ході НПД досліджених сплавів зростають, в основному, завдяки ЗМП, одночасно проходить і їх часткове заліковування, яке здійснюється також, головним чином, завдяки ЗМП. Пори-комплекси ростуть у ході НПД, в основному, внаслідок ВД, при цьому їх заліковування не здійснюється.

7. Для НПД досліджених сплавів з різними розмірами зерен є характерною сильна локальна неоднорідність, яка зумовлена наявністю зерномежевих пор. В тих ділянках, які оточують індивідуальну пору, деформація здійснюється, головним чином, завдяки ЗМП, а в ділянках, які межують з порами-комплексами, основний внесок у деформацію дає ВД.

8. Зіставлення величин внесків різних механізмів (ЗМП і ВД) у розвиток пор і локальну деформацію ділянок поблизу пор показало, що зерномежева пористість, яка розвивається під час НП течії, є деформаційною. Ріст і заліковування пор здійснюється за тими ж деформаційними механізмами, що і НПД.

9. Увесь комплекс проведених досліджень і отриманих результатів дає підставу стверджувати, що раніше запропонована теоретична модель здійснення НПД за участю зерномежевої пористості придатна і діє не тільки для опису НПД крупнозернистих полікристалів, а й дрібнозернистих і УДЗ матеріалів.

10. Позитивний вплив на розвиток ЗМП – головного деформаційного процесу НП течії – здійснюють лише індивідуальні зерномежеві пори, які забезпечують розвиток інтенсивного позеренного масопереносу. Однак накопичення пор-комплексів не є перешкодою для здійснення стійкої НП течії до значних ступенів деформації. Закономірності розвитку зерномежевої пористості, яка приймає участь у деформаційному процесі НП течії, є однотипними для досліджених алюмінієвих сплавів з різним розміром зерна.

Список цитованої літератури

1. Кузнецова Р.И. Роль зернограничной пористости в сверхпластичности // ФММ. – 1978. – Т. 45, вып. 3. – С. 641 – 646.
2. Кузнецова Р.И. Уровень зернограничной пористости при сверхпластическом течении // Докл. АН СССР. – 1982. – Т. 263, № 1. – С. 92 – 96.
3. Развитие пористости и разрушение при сверхпластическом течении сплава Al – 4 мас.% Cu / Р.И. Кузнецова, В.П. Пойда, Л.М. Летьяго, С.А. Бахарев // ФММ. – 1982. – Т. 54, вып. 6. – С. 1183 – 1187.
4. Сверхпластичность промышленного алюминиевого сплава 1201 в условиях ползучести / В.П. Пойда, Р.И. Кузнецова, Г.О. Братенькова, Т.Ф. Сухова // ФММ. – 1989. – Т. 67, вып.4. – С. 828 – 831.
5. Эволюция пористости и разрушение сплава Al – 4,1 % мас. Cu – 0.5 % мас. Zr в условиях сверхпластического течения / В.П. Пойда, Р.И. Кузнецова, Н.К. Ценев и др. // Металлофизика. – 1990. – Т. 12, № 1. – С. 44 – 48.

Список літератури за темою дисертації

1. Развитие зернограничной несплошности в ходе сверхпластического течения сложнелегированных алюминиево-литиевых сплавов / В.П. Пойда, В.В. Брюховецкий, Р.И. Кузнецова и др. // Функциональные материалы. – 1995. – Т. 2, № 4. – С. 523 – 527.

2. Механизмы развития зернограничных пор и локальная неоднородность деформации в условиях сверхпластического течения / Р.И. Кузнецова, В.В. Брюховецкий, В.П. Пойда, Т.Ф. Сухова // Металлофизика и новейшие технологии. – 1995. – Т. 17, № 8. – С. 64 – 72.
3. Структурная сверхпластичность сплава 1423 в условиях ползучести / В.П. Пойда, В.В. Брюховецкий, Р.И. Кузнецова и др. // Металлофизика и новейшие технологии. – 1996. – Т. 18, № 12. – С. 49 – 54.
4. Сверхпластичность, порообразование и разрушение конструкционного алюминиево-литиевого сплава 1450 в условиях ползучести / В.П. Пойда, Р.И. Кузнецова, В.В. Брюховецкий и др. // ХГУ, Харьков. – 1995. – 20 с: ил. - Библиография: 16 назв. - Рус. - Деп. в УкрГНТБ 10.07.95. – № 1746 – УК 95.
5. Сверхпластичность алюминиево-литиевых сплавов в условиях ползучести / В.П. Пойда, Т.Ф. Сухова, Р.И. Кузнецова, С.А. Бахарев, В.В. Брюховецкий, Р.И. Воронцова // Физические явления в твердых телах. Материалы конф., 2 – 4 февраля 1993 г. – Харьков. – 1993. – С. 39.
6. Особенности развития пористости в ходе сверхпластического течения сплава Al-Mg-Li-Zr / В.П. Пойда, Р.И. Кузнецова, Т.Ф. Сухова, В.В. Брюховецкий // Эволюция дефектных структур в металлах и сплавах. Сб. докл. II Междунар. школы-семинара 5 – 11 сентября 1994 г. – Барнаул. – 1994. – С. 234 – 235.
7. Структурная сверхпластичность сплава Al-Cu-Li-Zr-Sc / В.П. Пойда, В.В. Брюховецкий, Р.И. Кузнецова и др. // Тез. докл. Первой междунар. конф. “Актуальные проблемы прочности” 26-30 сентября 1994 г. – Новгород. – 1994. – Ч. 2. – С. 12.
8. Особенности накопления зернограничной несплошности в сложнелегированных алюминиево-литиевых сплавах / В.П. Пойда, Р.И. Кузнецова, Т.Ф. Сухова, В.В. Брюховецкий // Тез. докл. Первой междунар. конф. “Актуальные проблемы прочности” 26 – 30 сентября 1994 г. – Новгород. – 1994. – Ч. 2. – С. 11.
9. Развитие зернограничной несплошности в ходе сверхпластического течения сложнелегированных алюминиево-литиевых сплавов / В.П. Пойда, В.В. Брюховецкий, Р.И. Кузнецова, Т.Ф. Сухова // Физические явления в твердых телах. Материалы 2-ой конф. 1 – 3 февраля 1995 г. – Харьков: ХГУ. – 1995. – С. 79.

10. Механизмы развития индивидуальных зернограницных пор при сверхпластической деформации / В.В. Брюховецкий, Р.И. Кузнецова, В.П. Пойда, Т.Ф. Сухова // Физические явления в твердых телах. Материалы 2-ой конф. 1 – 3 февраля 1995 г. – Харьков: ХГУ. – 1995. – С. 78.
11. Локализация деформации и механизмы развития пористости в условиях сверхпластического течения / В.В. Брюховецкий, Р.И. Кузнецова, В.П. Пойда, Т.Ф. Сухова // Физика прочности и пластичности материалов. Тез. докл. XIV Междунар. конф. 27 – 30 июня 1995 г. – Самара. – 1995. – С. 137 – 138.
12. Структурная сверхпластичность ультрамелкозернистых сложнолегированных алюминий-литиевых сплавов / В.П. Пойда, В.В. Брюховецкий, Р.И. Кузнецова и др. // Физика прочности и пластичности материалов. Тез. докл. XIV Междунар. конф. 27 – 30 июня 1995 г. – Самара. – 1995. – С. 135 – 137.
13. Структурная сверхпластичность и разрушение конструкционных сложнолегированных алюминий-литиевых сплавов 1450, 1421, 1423 в условиях ползучести / В.П. Пойда, В.В. Брюховецкий, Р.И. Кузнецова и др. // Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений. Тез. докл. Междунар. конф. 24 - 28 июня 1996 г. – Тамбов. – 1996. – С. 105 – 107.
14. Брюховецкий В.В., Пойда В.П., Кузнецова Р.И. Особенности структурных изменений в ходе сверхпластического течения сплава 1421 // Тез. докл. XXXII семинара “Актуальные проблемы прочности” 12-14 ноября 1996 г. – С.-Петербург. – 1996. – С. 15-16.
15. Брюховецкий В.В., Кузнецова Р.И., Пойда В.П. Высокоскоростная сверхпластичность сплава Al – 4 мас.% Cu // Тез. докл. XXXII семинара “Актуальные проблемы прочности” 12 – 14 ноября 1996 г. – С.-Петербург. – 1996. – С. 27 – 28.
16. Закономерности формирования ультрамелкозернистой структуры в ходе сверхпластического течения сложнолегированных алюминий-литиевых сплавов 1450 и 1423 / В.П. Пойда, В.В. Брюховецкий, Р.И. Кузнецова и др. // Эволюция дефектных структур в конденсированных средах. Тез. докл. III Междунар. школы-семинара 28 августа – 3 сентября 1996 г. – Барнаул. – 1996. – С. 31.

Ключові слова: надпластичність, надпластична деформація, зерномежева пористість, механізми розвитку пор, локальна неоднорідність надпластичної деформації.

Брюховецкий В.В. Динамика развития пористости в сплавах на основе алюминия в условиях структурной сверхпластичности.

Диссертация в форме рукописи на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела, Харьковский государственный университет, г. Харьков. Украина. 1996.

Работа базируется на 16 научных работах. Экспериментально исследованы закономерности развития зернограницной пористости различной морфологии в условиях сверхпластической деформации сложнотвердевших алюминий-литиевых сплавов 1421, 1423, 1450. Предложена методика количественного изучения механизмов развития пористости различной морфологии в ходе сверхпластического течения. Установлены механизмы развития пористости в ходе сверхпластической деформации сплавов Al – 4 мас.% Cu, 1201, Al – 4,1 мас.% Cu – 0,5 мас.% Zr. Исследована локализация сверхпластической деформации, обусловленная наличием в материале зернограницных пор.

Ключевые слова: сверхпластичность, сверхпластическая деформация, зернограницная пористость, механизмы развития пор, локальная неоднородность сверхпластической деформации.

Brukhovetsky V.V. Cavities development dynamics in the alloys on the aluminium basic in conditions of structural superplasticity.

Manuscript dissertation is to achieve the degree of candidate of physical and mathematical science on Speciality 01.04.07 – Solid state physics. Kharkov State University. Kharkov. Ukraine. 1996.

16 scientific works are maintained. Development regularities of grain boundary cavities with different morphology in the superplastic deformation conditions of multicomponent aluminium-lithium alloys 1421, 1423 and 1450 have been studied experimentally. Quantity study method of mechanisms of grain boundary cavities with different morphology development during the superplastic flow has been proposed. Mechanisms of grain boundary cavities development in the superplastic deformation conditions Al – 4 wt.% Cu, 1201, Al – 4,1 wt.% Cu – 0,5 wt.% Zr have been determined. Superplastic deformation localization caused by presence grain boundary cavities in material were studied.

Key words: superplasticity, superplastic deformation, grain boundary cavities, mechanisms development of cavities, local unhomogeneous superplastic deformation.

Ответственный за выпуск Р.И. Кузнецова

Подписано в печать 20. 02. 97. Формат 60x84¹/₁₆. Усл. печ. л. 0,125.

Бумага финская. Гарнитура Times ET.

Тираж 100 экз. Заказ № 1053.

Отпечатано на ризографе ООО "КиПи-РИЗО".

310166, г.Харьков, пр. Ленина 17а, к. 405.

