

УДК 669.715

Т.А. Аюпова¹, О.А. Носко¹, О.А. Аюпов¹¹Український державний університет науки і технологій

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛИВАРНОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ В ГРАНИЧНО ДЕФОРМОВАНОМУ СТАНІ

Встановлені особливості структуроутворення гранично деформованого ливарного алюмінієвого сплаву АК7ч. В ході експерименту, проведеного за планом ортогональних латинських квадратів отримано залежності параметрів структури дослідного сплаву в литому та гранично деформованому стані від вмісту елементів-модифікаторів та швидкості кристалізації. Встановлене істотне підвищення параметра кристалічної решітки α -Al в деформованому стані у порівнянні з литим для усіх сплавів на основі АК7ч незалежно від мікролегування та швидкості кристалізації. В α -Al в деформованому стані збільшується розчинність скандію і заліза. Із залученням розрахункової методики визначення граничного ступеня деформації металів при прокатці клиновидних зразків отримані залежності технологічної деформівності від складу сплаву типу АК7ч та режиму водневого оброблення його розплаву. Вперше методом прокатки отримана штаба товщиною 2,4 мм із заготовки сплаву АК7ч(Sr,Sc) з максимальною товщиною 11 мм. Істинна деформація сплаву АК7ч(Sr,Sc) після водневого оброблення (витримка після гідрування 20 хв) склала 1,19.

DOI: 10.34185/0543-5749.2021-3-3-17

Вступ

Проблема забезпечення якості продукції завжди є найважливішою для вчених, виробників та споживачів. Ще більш гостро вона стоїть в даний час у зв'язку з переходом на ринкові умови господарювання, загостренням конкуренції вітчизняних товаровиробників, як між собою, так і іноземними фірмами. Особливе значення має підвищення якості продукції в галузі машинобудування, рівень якої визначає темпи технічного прогресу у всіх інших галузях.

Сучасні ливарні сплави на основі алюмінію – складнолеговані багатокомпонентні системи Al-Si, Al-Si-Mg, Al-Si-Mg-Mn, Al-Cu-Si-Mg, Al-Mg-Si-Cu та ін., з додаванням елементів-модифікаторів або без, є багатоманітними за структурою, фазовим складом, як наслідок, та властивостями; ці сплави широко використовуються у промисловості, зокрема у машинобудуванні.

Механічні властивості ливарних алюмінієвих сплавів визначаються структурою та фазовим складом, кількістю, типом і структурою інтерметалідів, що утворюються, кількісними

характеристиками первинних кристалів та евтектичної складової [1]. Всі перераховані переваги структури та фазового складу ливарних сплавів на основі алюмінію досягаються за рахунок керованого оптимального мікролегування, додатковий позитивний вплив здійснює комплексна фізико-хімічна обробка у рідкому та твердому стані.

Детально розроблено теоретичні основи створення нових оптимально модифікованих ливарних сплавів на основі систем Al-Si, Al-Si-Mg-Mn, Al-Mg-Si-Cu та ін. з високим комплексом механічних властивостей [2-7] (одночасно міцності та пластичності), з підвищеними показниками зносостійкості, корозійної стійкості, низьким коефіцієнтом термічного розширення [8-10].

Незважаючи на це, механізм мікролегування ливарних сплавів на основі алюмінію є недостатньо вивченим. Для реалізації повною мірою властивостей нових оптимально модифікованих матеріалів на основі алюмінію є необхідними дослідження характеристик структури, фазового складу, фазових і структурних переворотів в процесі формування структури на кожному етапі

переробки сплавів (мікролегування, обробка розплаву, обробка тиском).

Структура литого алюмінієво-кремнієвого сплаву складається з слабо розгалужених дендритів α -Al, грубо диференційованої α -Al- β -Si евтектики і включень інтерметалідних фаз.

Для пластично деформованих алюмінієвих сплавів характерні наступні структурні зміни [1]:

- геометрична орієнтація зерен α -Al твердого розчину, кристалів евтектичного кремнію і інтерметалідів;
- формується кристалографічне орієнтування або текстура деформації α -Al;
- виявляється підвищена щільність дислокацій.

Для визначення впливу обраних незалежних змінних на міцність і пластичність проводили випробування на стиснення до руйнування, в результаті чого були отримані частинні залежності впливу обраних незалежних змінних (% Sr, % Sc, Vохл) на зазначені характеристики. Однак, вплив зазначених незалежних змінних на структуру сплаву АК7ч в гранично деформованому стані залишився нез'ясованим.

Метою даної дослідної роботи є встановлення закономірностей впливу стронцію, скандію, швидкості охолодження при кристалізації на структуроутворення сплаву АК7ч в деформованому стані з граничним ступенем пластичної деформації для отримання нових ливарних алюмінієвих сплавів, що деформуються, та цілеспрямованого керування структурою та властивостями при розробці ливарних сплавів на основі АК7ч, що деформуються.

Методика

У роботі досліджували гранично деформовані доевтектичні силуміни на базі АК7ч (система Al-Si-Mg-Fe) з добавками стронцію і скандію (таблиця 1).

У зв'язку з наявністю великої кількості можливих поєднань незалежних змінних (% Sr, % Sc, Vохол) експеримент проводили за планом ортогональних латинських квадратів [11] (рис. 1). Для кожної комірки представленої матриці виготовляли зразки сплаву згідно тризначного коду, в якому позиція цифри позначає незалежну змінну, а її значення - рівень змінної. Відповідні дані представлені в таблиці 2.

Дослідні сплави, виготовляли на базі алюмінію марки А9, напівпровідникового кремнію, лігатур Al-5% Sr, Al-2% Sc. Дослідження з вибору

ефективних модифікаторів, вплив їх на структуроутворення і фазовий склад сплавів проводили в лабораторних умовах в печах типу СНОЛ-2.5, 2.5,2.5 / 2М і СШОЛ-11, 6/12-М3.

Розрахункову кількість стронцієвий лігатури (згідно з даними табл. 1 і 2 та рис. 1) вводили при 750 °С в розплав, витримували 25 ... 30 хв., потім вводили розрахункову кількість скандієві лігатури, витримували 25 ... 30 хв., ретельно перемішували і охолоджували з різними швидкостями відповідно до даних рис. 1 та табл. 2. Швидкість охолодження при кристалізації сплавів визначали методом термічного аналізу. Гранична деформація зразків сплавів типу АК7ч отримана під час випробування сплаву на стискання.

Для виявлення загальної мікроструктури зразки травили 0,5% водним розчином плавикової кислоти. Мікроструктуру сплавів вивчали за допомогою оптичного мікроскопу «Axiovert-200MAT».

Кількість евтектичної складової, розміри кристалів евтектичного кремнію визначали за стандартними методиками. Параметр форми кристалів евтектичного кремнію визначали як співвідношення довжини та ширини кристалу.

Мікротвердість алюмінієвого твердого розчину і евтектики вимірювали на приладі ПМТ -3 за ДСТУ ISO 6507-1:2007 при навантаженні 20 г і збільшенні X485.

Ідентифікацію фаз проводили методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН - 3М в CoK_α фільтрованому випромінюванні за стандартною методикою. В якості еталону використовували відпалений протягом 16 годин з подальшим охолодженням з піччю алюміній марки А999. Для визначення параметра решітки алюмінієвого твердого розчину записували профіль дифракційних максимумів (420) Al. Запис дифрактограм проводили зі швидкістю (1/8) °/хв. Параметр решітки розраховували по положенню центру мас зазначених вище дифрактометричних максимумів.

Випробування на стискання проводили на циліндричних зразках діаметром 6 мм і висотою 11 мм на випробувальній машині FP-100/1, при максимальному навантаженні 40кН, в масштабі 10:1. Швидкість деформації становила 1,6 мм/хв. Механічні властивості сплавів на основі АК7ч при випробуванні на стискання представлені в таблиці 3.

Таблиця 1. Середній хімічний склад досліджуваних сплавів

№ з/п	Хімічний елемент, %мас.						
	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Sr	Sc
1	ОСНОВА	7.18	0.332	0.226	0.612	-	-
2		7.10	0.314	0.219	0.599	0.049	0.112
3		7.08	0.324	0.225	0.612	0.102	-
4		7.01	0.320	0.224	0.608	0.198	-
5		7.13	0.331	0.223	0.611	-	0.115
6		7.09	0.311	0.222	0.601	-	0.313
7		7.04	0.318	0.220	0.602	0.048	0.121
8		7.15	0.304	0.217	0.596	0.098	0.331
9		7.07	0.289	0.185	0.579	0.223	0.522
10		7.14	0.314	0.221	0.597	0.052	0.326
11		7.11	0.298	0.207	0.585	0.111	0.509
12		6.99	0.309	0.215	0.605	0.194	0.099
13		7.13	0.303	0.213	0.593	0.051	0.497

111	222	333	444
234	341	412	123
342	413	124	231
423	134	241	312

Рис. 1. План експерименту

Таблиця 2. Рівні варіювання незалежних змінних

Параметр (незалежна змінна)	№ незалежної змінної	Рівні варіювання			
		1	2	3	4
Sr, %мас.	1	0	0,05	0,1	0,2
Sc, %мас	2	0	0,1	0,3	0,5
$V_{охл}$, К/с	3	Піч $6,67 \cdot 10^{-4}$	Повітря $6,67 \cdot 10^{-3}$	Чавунний циліндр 10^2	Мідний клин 10^3

Таблиця 3. Механічні властивості сплаву АК7ч при випробуванні на стискання

№	% Sr	% Sc	$V_{охл}$, К/с	σ_{02} , МПа	$\sigma_{в}$, МПа	ϵ , %	ψ , %
1	0	0	$6,67 \cdot 10^{-4}$	71,4	244	67,1	76,7
2	0,05(0,049)	0,1(0,112)	$6,67 \cdot 10^{-3}$	78,0	267	61,8	74,1
3	0,1 (0,098)	0,3(0,331)	100	100,1	330	63,2	71,3
4	0,2 (0,223)	0,5(0,522)	1000	212,3	440	45,8	35,2
5	0,05(0,052)	0,3(0,326)	1000	206,9	405	38	30,7
6	0,1 (0,111)	0,5(0,509)	$6,67 \cdot 10^{-4}$	98,0	222	64,8	74,9
7	0,2(0,198)	0	$6,67 \cdot 10^{-3}$	109,1	244	62,0	59,3
8	0	0,1(0,115)	100	107,8	293	73,0	91,9
9	0,1(0,111)	0,5(0,509)	$6,67 \cdot 10^{-3}$	176,3	368	64,0	79,9
10	0,2(0,198)	0	100	97,4	305	71,4	81,3

Продовження табл. 3.

№	% Sr	% Sc	$V_{охл}$, К/с	σ_{02} , МПа	$\sigma_{в}$, МПа	ϵ , %	ψ , %
11	0	0,1(0,115)	1000	137,3	352	56,0	62,0
12	0,05(0,052)	0,3(0,326)	$6,67 \cdot 10^{-4}$	112,3	333	60,9	70,6
13	0,2(0,194)	0,1(0,099)	100	96,7	330	68,5	102,7
14	0	0,3(0,313)	1000	180,2	440	47,6	38,0
15	0,05(0,051)	0,5(0,497)	$6,67 \cdot 10^{-4}$	82,9	246	73,3	79,9
16	0,1(0,102)	0	$6,67 \cdot 10^{-3}$	82,6	270	76,0	106,1

Технологічну граничну деформованість прокаткою клиновидних зразків дослідних сплавів розраховували за методикою [12].

Мікроструктури сплавів на основі АК7ч після граничної деформації, що відповідають плану експерименту (див. рис. 1 і табл. 2), відображені на рис. 2...3.

Результати мікроструктурного аналізу показують, що деформація при випробуванні на стискання зі ступенем деформації 37 ... 45% не призводить до суттєвих змін як в орієнтації, так і морфології евтектичного кремнію і інтерметаллідних фаз (сплави №№ 4, 5, див. рис. 2 і 3).

Збільшення ступеня деформації до 45 ... 55% призводить до геометричній орієнтації зерен α -Al фази в напрямку, перпендикулярному головній осі деформації (сплави №№ 11, 14). Подальше збільшення ступеня деформації до 60 ... 76% призводить до зростання інтенсивності процесу геометричної орієнтації зерен α -Al фази в напрямку, перпендикулярному головній осі деформації (сплави №№ 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 16), а також до часткового дроблення евтектичного кремнію і інтерметаллідних фаз.

Результати рентгеноструктурного аналізу показують, що пластична деформація не призводить до суттєвих змін фазового складу сплаву, лише незначно змінюючи кількість інтерметаллідних складових. Про це свідчать зміни інтенсивності дифракційних максимумів інтерметаллідних фаз (таблиця 4).

Співвідношення між інтенсивністю дифракційних максимумів фаз $FeAl_3$, Fe_2Al_5 , Al_3Sc і характеристик пластичності і опору деформації в залежності від модифікування і швидкості охолодження для сплаву АК7ч представлено в таблиці 5.

З табл. 5 видно, що пластична деформація призводить до виділення кремнієвої фази для всіх сплавів АК7ч (крім сплаву №13), про що свідчить збільшення інтенсивності дифракційних максимумів кремнієвої фази на 2 ... 6 од.

інтенсивності.

Пластична деформація зі ступенем деформації 45,8% (зразок № 4) призводить до істотного розчинення залізовмісних фаз, кількість фази Al_3Sc залишається незмінною.

Збільшення ступеня деформації до 63 ... 64% (зразки № 3 і 9) викликає також розчинення фази Al_3Sc , про що свідчить зміна інтенсивності дифракційних максимумів зазначеної фази на 3 ... 4 од. інтенсивності. Сплави, що містять скандій в кількості 0,1% (№№8, 13) мають більш високі значення ступеня деформації (73 ... 97%), інтенсивність дифракційних максимумів залізовмісних фаз для цих сплавів змінюється в меншому ступені (на 1 ... 3 од. інтенсивності).

Аналогічними є зміни інтенсивності дифракційних максимумів (на 2 ... 3 од.) для сплаву №1, деформованого зі ступенем деформації 67%. У сплавів з великим вмістом стронцію, що не містять скандію ступінь граничної деформації становить 62 ... 71% (сплави №7, 10), зміна інтенсивності дифракційних максимумів фаз $FeAl_3$ і Fe_2Al_5 становить 5 ... 11 од. інтенсивності.

Результати вимірювань параметра кристалічної решітки α -алюмінієвого твердого розчину в сплаві АК7ч в литому і деформованому з граничним ступенем деформації станах представлені на рис. 4. Спостережувана зміна параметра кристалічної решітки, ймовірно, пов'язана з накопиченням дефектів кристалічної будови і перерозподілом легуючих елементів в процесі пластичної деформації. При цьому, вплив елементів, що збільшують параметр решітки (Mg, Sr, Sc), переважає над впливом елементів, його зменшують (Si, Fe).

Для кількісного аналізу отриманих даних функції відгуку (розміри кристалів евтектичного кремнію $D_{деф}$, параметр форми $A_{деф}$ кремнієвих кристалів і відстань $L_{деф}$ між кристалами кремнію в евтектиці) визначали за стандартними методиками (рис. 5...7).

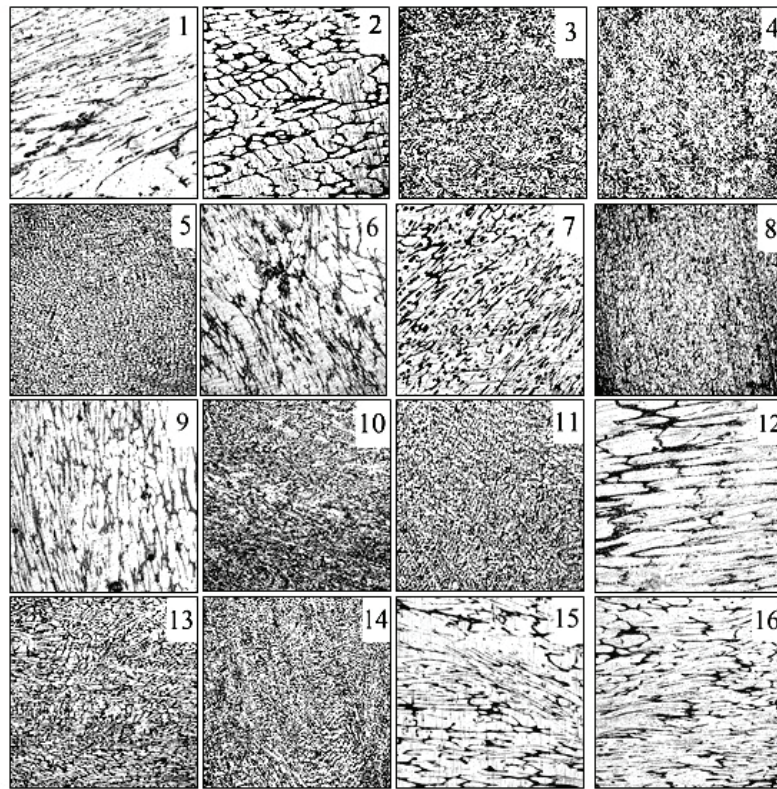


Рис. 2. Мікроструктури сплаву АК7ч, отримані у відповідності до плану експерименту після деформації, x100

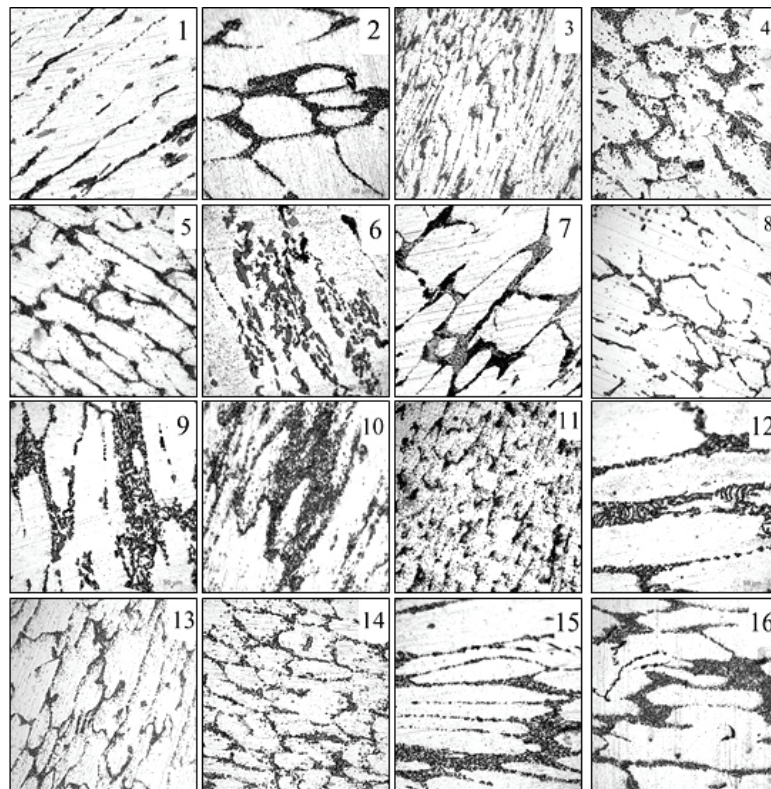


Рис. 3. Мікроструктури сплаву АК7ч, отримані у відповідності до плану експерименту після деформації, №№ 1, 2, 6, 7, 9, 12, 15, 16 – x500; №№ 3, 4, 5, 8, 10, 11, 13, 14 – x1000

Таблиця 4. Результати фазового рентгеноструктурного аналізу сплаву АК7ч в литому і деформованому стані

Фаза	Інтенсивність, од		Тип решітки	Параметри решітки, Å
	литий	деформ.		
1	2	3	4	5
Fe ₂ Al ₅	10	7	Орторомбічна	$a=7.765$ $b=6.403$ $c=4.203$
FeAl ₂ (SiO ₄) ₃	11	8	Кубічна	$a=11.53$
FeAl ₃	12	7	Орторомбічна	$a=47.43$ $b=15.45$ $c=8.07$
α -Al ₂ O ₃	9	6	Гексагональна	$a=4.758$ $c=12.991$
Mg ₂ Si	25,5	17	Кубічна	$a=12.63$
Al ₅ SiFe	11	-	Моноклинна	$a=6.12$, $b=6.12$ $c=41.5$ $\beta = 91^{\circ}$
SrSi	13	7	Орторомбічна	$a=4,83$ $b=11,33$ $c=4,04$
AlSr	28	11	Кубічна	$a=15,8$
Al ₄ Sr	14	7	Тетрагональна	$a=4,46$ $c=11,07$
ScSi	6	7	Орторомбічна	$a=3,99$ $b=9,88$ $c=3,659$
Al ₃ Sc	12	21	Кубічна	$a=4,106$

Таблиця 5. Співвідношення між інтенсивністю дифракційних максимумів фаз FeAl₃, Fe₂Al₅, Al₃Sc і характеристик пластичності і міцності в залежності від модифікування і швидкості охолодження

№ сплава	Фаза	Інтенсивність, од		Відносне стискання, %	Границя текучості, МПа
		Литий	Деформ.		
1	Si _{ЕВТ}	22	23	67	71
	FeAl ₃	11	7.5		
	Fe ₂ Al ₅	10	8.0		
	Al ₃ Sc	-	-		
3	Si _{ЕВТ}	16	22	63	100
	FeAl ₃	12.5	11		
	Fe ₂ Al ₅	9.3	8.5		
	Al ₃ Sc	11.5	8.5		
4	Si _{ЕВТ}	24	26	45.8	212
	FeAl ₃	17	13		
	Fe ₂ Al ₅	13	9		
	Al ₃ Sc	12	12		
7	Si _{ЕВТ}	23	28	62	109
	FeAl ₃	9	5		
	Fe ₂ Al ₅	14	4		
	Al ₃ Sc	-	-		
8	Si _{ЕВТ}	18	21	73	108
	FeAl ₃	12	11		
	Fe ₂ Al ₅	13	11.5		
	Al ₃ Sc	-	-		
9	Si _{ЕВТ}	32	33	64	176
	FeAl ₃	7	3.5		
	Fe ₂ Al ₅	7	3.5		
	Al ₃ Sc	14	10		
10	Si _{ЕВТ}	22	24	71.4	97.4
	FeAl ₃	15	8.5		
	Fe ₂ Al ₅	16	5		
	Al ₃ Sc	-	-		
13	Si _{ЕВТ}	22	21	97	69
	FeAl ₃	9	6		
	Fe ₂ Al ₅	11	11		
	Al ₃ Sc	-	-		

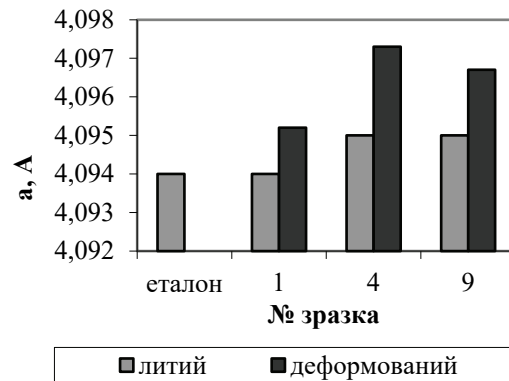


Рис. 4. Зміна параметра кристалічної решітки α -алюмінієвого твердого розчину в сплаві АК7ч в литому і деформованому стані в залежності від модифікування і швидкості охолодження сплаву

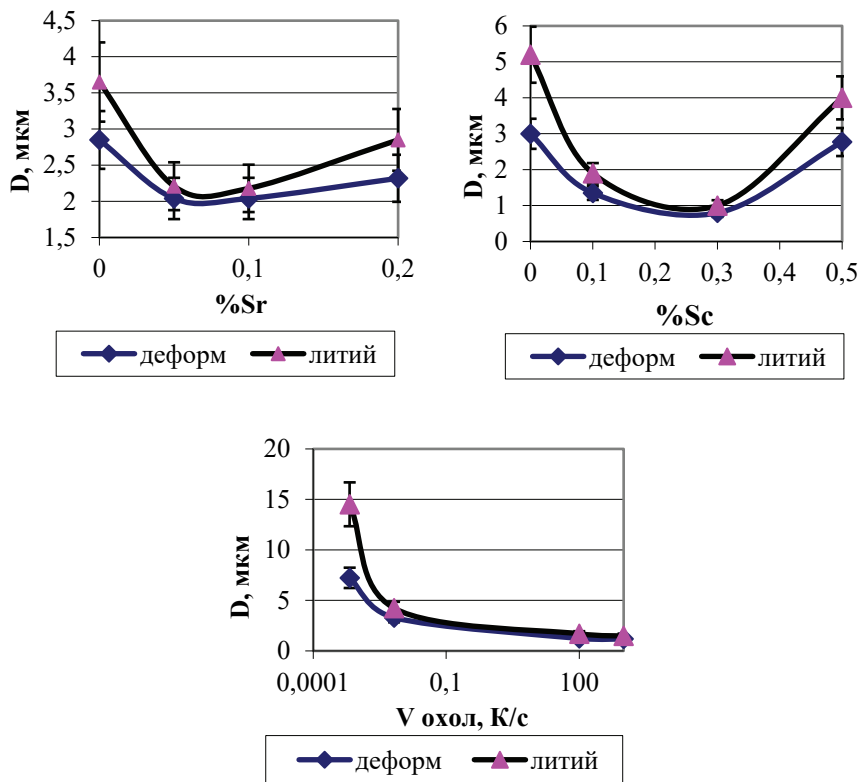


Рис. 5. Частинні залежності розміру кристалів евтектичного кремнію від вмісту стронцію, скандію і швидкості кристалізації в сплаві АК7ч в литому і деформованому стані

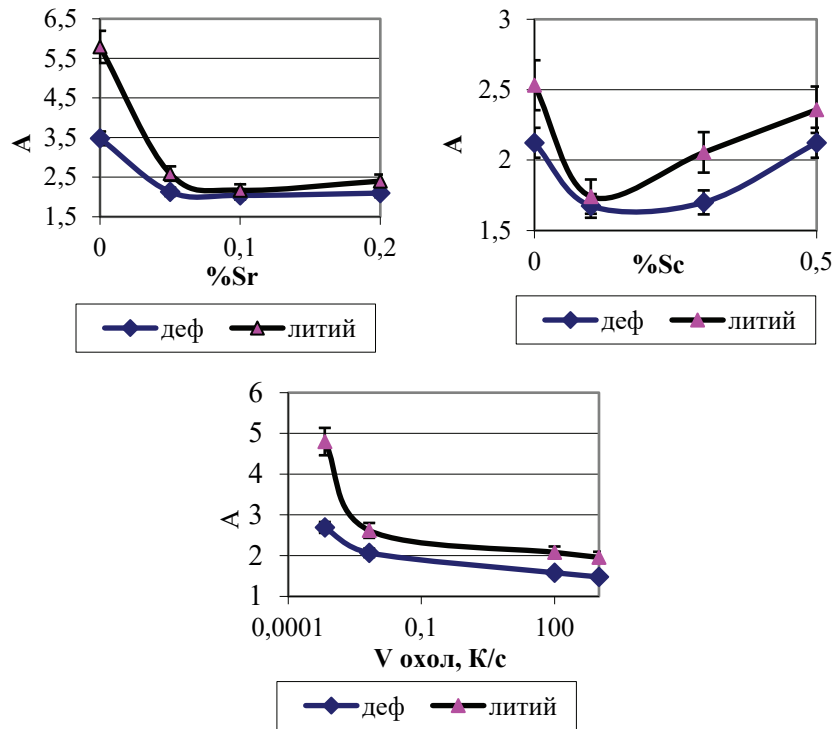


Рис. 6. Частинні залежності параметра форми кристалів кремнію в евтектиці від вмісту стронцію, скандію і швидкості кристалізації в сплаві АК7ч в литому і деформованому стані

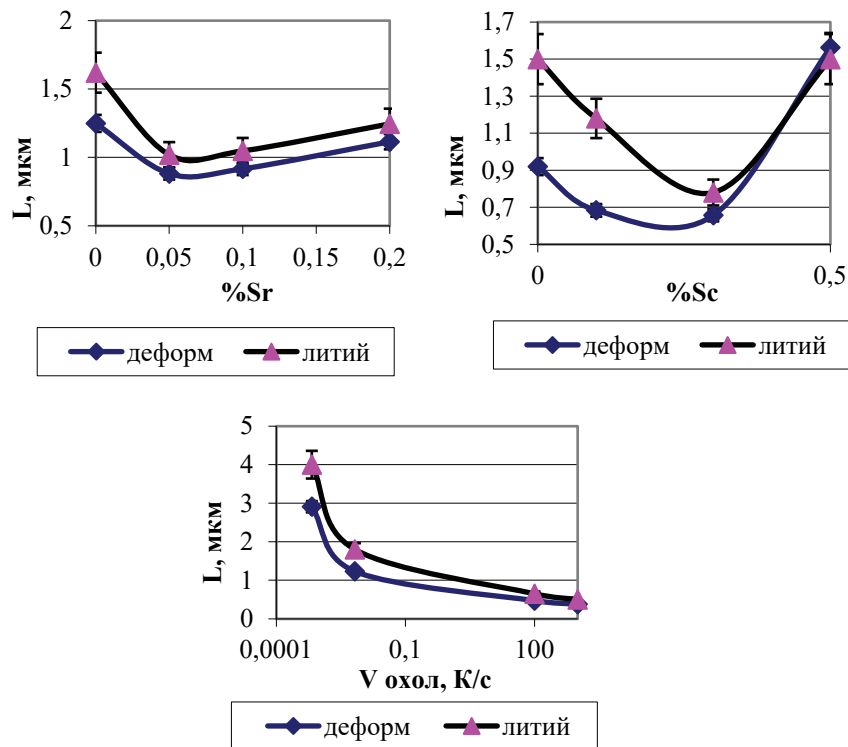


Рис. 7. Частинні залежності відстані між кристалами кремнію в евтектиці від вмісту стронцію, скандію і швидкості кристалізації в сплаві АК7ч в литому і деформованому стані

Кількісні залежності $D_{деф}$, $A_{деф}$ і $L_{деф}$ від незалежних змінних ($Sr\%$, $Sc\%$, $V_{охл}$) отримані після відомої процедури обробки експериментальних даних для ортогональних латинських планів [11]. Ця процедура полягає в логарифмуванні відповідних кількісних даних, усередненні їх для кожного рівня кожної незалежної змінної, потенціюванні і прив'язці отриманих залежностей до умов проведення дослідів кількісні залежності $E_{деф}$, $D_{деф}$, $A_{деф}$ і $L_{деф}$ від незалежних змінних ($Sr\%$, $Sc\%$, $V_{охл}$) як для литого, так і для деформованого з граничним ступенем деформації сплаву АК7ч.

З рисунків 5...7 видно, що деформація сплаву АК7ч з граничним ступенем деформації якісно не змінює хід кривих частинних залежностей $E_{деф}$, $D_{деф}$, $A_{деф}$ і $L_{деф}$ відносно ходу кривих частинних залежностей E , D , A , і L для сплаву АК7ч в литому стані, проте, впливає на їх кількісні значення.

Зменшення середнього розміру кристалів евтектичного кремнію, параметра форми кристалів евтектичного кремнію і відстані між кристалами кремнію в евтектиці (див. рис. 6...7), ймовірно, пов'язані з дробленням евтектичного кремнію, особливо в грубодиференційованих евтектиках і орієнтацією кристалів евтектичного кремнію в напрямку, перпендикулярному осі деформації, що підтверджується аналізом мікроструктури сплаву АК7ч (див. рис. 2 ... 3).

Хід кривих частинних залежностей мікротвердості евтектичної складової H_m (див. рис. 8) від кількості стронцію і скандію також не змінюється, проте, знезміцнення евтектики при переході через концентрацію стронцію 0,05% для деформованого сплаву є не настільки істотним, як для сплаву в литому стані. Також не виявлено екстремальної залежності мікротвердості евтектики від швидкості охолодження при кристалізації в деформованому стані на відміну від литого.

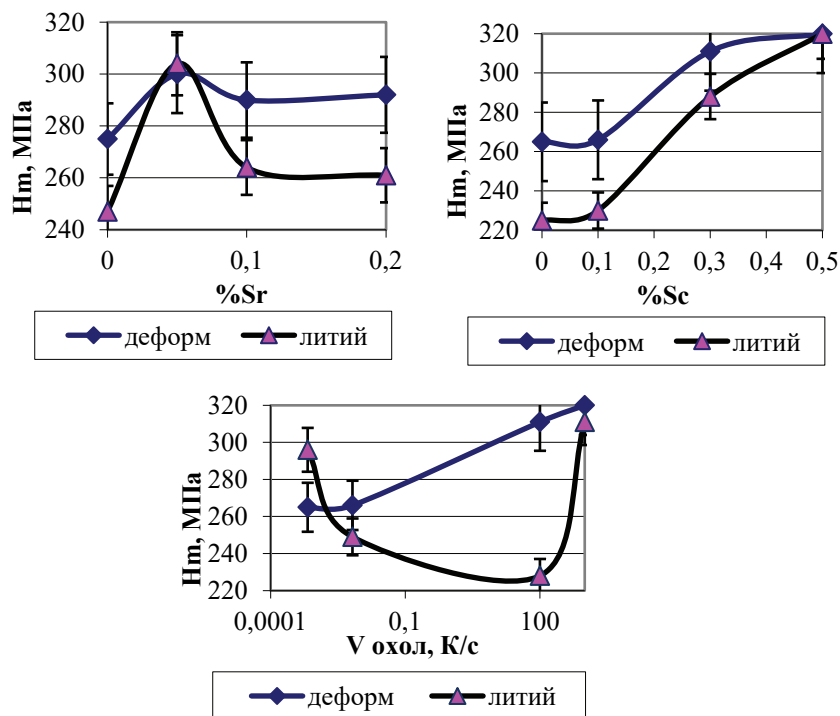


Рис. 8. Частинні залежності мікротвердості евтектичної складової від вмісту стронцію, скандію і швидкості кристалізації в сплаві АК7ч в литому і деформованому стані

Конкретне визначення залежності параметрів структури для деформованого сплаву АК7ч $D_{деф}$, $A_{деф}$ і $L_{деф}$ від незалежних змінних проводиться за формулою (1). Для $D_{деф}$ величина N дорівнює 0,135; для $A_{деф}$ і $L_{деф}$ величина N дорівнює 0,281 і 0,5728 відповідно. Дисперсія

дослідів для $D_{деф}$, $A_{деф}$ і $L_{деф}$ складає 10%, 5%, 5% відповідно.

$$X = N \cdot \varphi(\%Sr) \cdot \varphi(\%Sc) \cdot \varphi(V_{охл}) \quad (1)$$

На підставі отриманих даних провели дослідну холодну прокатку клиновидних зразків

сплавів на основі АК7ч вихідного складу, АК7ч(0,1%Sr-0.5%Sc) в литому стані та після водневої обробки розплаву [12]. Граничну деформацію при прокатці клиновидних зразків оцінювали за новітньою розрахунковою методикою [13]. Вид характерних зразків до і після прокатки представлений на рис. 9.

Результати визначення граничного ступеня деформованості представлені на рис. 10. Ці дані свідчать про наступне:

- воднева обробка розплаву незначно впливає на граничний ступінь деформованості сплаву АК7ч вихідного складу, спостерігається підвищення граничного ступеня деформованості на

9%;

- зіставлення даних деформованості сплаву АК7ч вихідного складу і сплаву АК7ч, що містить комплекс стронцій-скандій, підтверджує факт підвищення пластичності в литому стані при введенні комплексу стронцій-скандій на 32%;

- найбільший вплив на деформованість сплаву АК7ч надає комплексна фізико - хімічна обробка розплаву – мікролегування стронцієм і скандієм - воднева обробка (20 хвилин); деформованість сплаву підвищується на 60% у порівнянні з литим сплавом вихідного складу.

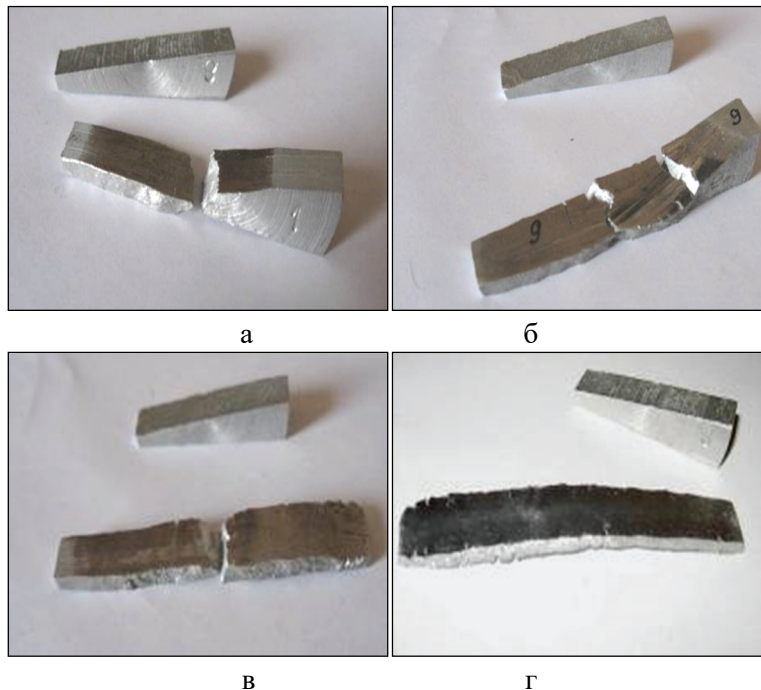


Рис. 9. Вид зразків сплаву АК7ч в до і після випробувань технологічної реформованості: а, б – сплав АК7ч вихідного складу; в, г – сплаву, АК7ч(0,1%Sr-0.5%Sc); а, в - в литому стані; б, г - після водневої обробки 20-40хв

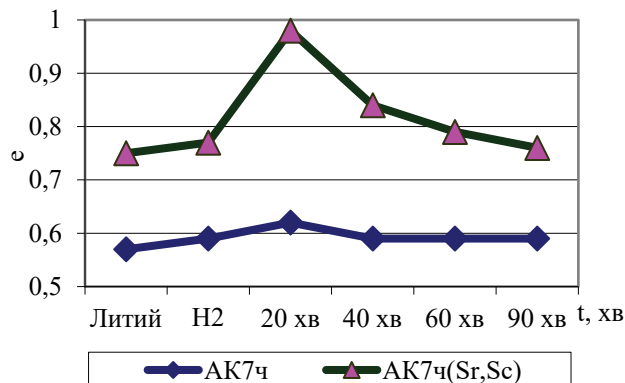


Рис. 10. Залежності технологічної деформованості сплавів АК7ч - вихідного складу та сплаву, що містить комплекс стронцій-скандій, від режиму водневої обробки розплаву

У другій серії експериментів реалізовували двопрхідну прокатку клиновидних зразків із забезпеченням мінімально можливої товщини без руйнування. Отримані прокатані зразки з оптимальною обробкою без руйнування. Сумарна істинна деформація сплаву АК7ч(0.1%Sr-0.5%Sc), після водневої обробки (витримка після гідрування 20 хв) склала 1,19 [13]. Це дозволило використовувати ливарний сплав типу АК7ч з оптимальним співвідношенням стронцію та скандію і оптимальним часом водневої обробки в процесах пластичної обробки тиском, зокрема, прокаткою.

Висновки

1. В ході експерименту, проведеного за планом ортогональних латинських квадратів, досліджено структуру сплаву АК7ч - в литому і деформованому з граничним ступенем деформації стані. Деформація при випробуванні на стискання зі ступенем 37 ... 45% не призводить до суттєвих змін в орієнтації та морфології евтектичного кремнію і інтерметалідів. Збільшення ступеня деформації до 63...73% призводить до геометричної орієнтації зерен α -Al в напрямку, перпендикулярному головній осі деформації і до часткового дроблення евтектичного кремнію і інтерметалідних фаз.

3. Результати фазового рентгеноструктурного аналізу демонструють, що пластична деформація не призводить до суттєвих змін фазового складу сплаву в порівнянні з литим станом, лише незначно змінюючи кількість інтерметалідних складових. Встановлене істотне підвищення параметра кристалічної решітки α -Al в деформованому стані у порівнянні з литим для усіх сплавів на основі АК7ч незалежно від мікролегування та швидкості кристалізації. В α -Al в деформованому стані збільшується розчинність скандію і заліза, в результаті чого зменшується кількість інтерметалідів $FeAl_3$, Fe_2Al_5 , Al_3Sc .

4. Із залученням розрахункової методики визначення граничного ступеня деформації металів при прокатці клиновидних зразків отримані залежності технологічної деформівності від складу сплаву типу АК7ч та режиму водневого оброблення його розплаву, які свідчать про підвищення деформівності сплаву на 60 % при комплексному фізико-хімічному впливі мікролегування стронцієм і скандієм та водневого оброблення розплаву впродовж 20 хвилин у порівнянні з литим сплавом вихідного складу.

5. Вперше методом прокатки отримана штаба товщиною 2,4 мм із заготовки комплекснолегованого сплаву АК7ч(Sr,Sc) з максимальною товщиною 11 мм, що дозволяє розширити можливості використання ливарного сплаву АК7ч для виготовлення виробів як методом лиття так і із застосуванням методів обробки тиском. Істинна деформація сплаву АК7ч(Sr,Sc) після водневого оброблення (витримка після гідрування 20хв) склала 1,19.

Бібліографічний список

1. Строганов Г. Б. Высокопрочные алюминиевые сплавы. М. : Металлургия, 1985, 216 с.
2. Куцова В. З., Аюпова Т. А. Влияние микролегирования Sr и Sc на структуру сплава АК7ч / Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. тр. – вып. 36, ч.1. – Днепропетровск, ПГАСиА, 2006. С. 20--209.
3. Куцова В. З., Аюпова Т. А., Амбражей М.Ю. Влияние микролегирования Sr и Sc на фазовый состав и свойства АК7ч / Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. тр. – вып. 41, ч.1. – Днепропетровск, ПГАСиА, 2007. С. 18-30.
4. Таран Ю. Н., Куцова В. З., Ковальчук М. Г., Узлов К. И. Структура и фазовый состав силуминов, модифицированных стронцием // Известия вузов. Цветная металлургия. 1988. №3. С. 78–84.
5. Куцова В. З., Швець О. В., Аюпова Т. А. Модифікування алюмінієвих сплавів. «МОМ». 2001. №1-2. С. 99–109.
6. Beresina A. I., Chuistov K. V., Monastyrskaya T. A. The stability of structure states of Al-Mg, Al-Li-Mg alloys, alloyed by Sc, Zr and Hf//Proc.of the 3rd European Conference on Light Alloys and Composites. Zakopane, (Poland). 1999. P. 43-48.
7. Dobatkina T. V., Rokhlin L. L., Characterova M. L. Phase diagrams of the aluminium – base alloys containing scandium // Proc.of the 3rd European Conference on Light Alloys and Composites. Zakopane, (Poland). 1999. P. 55–60.
8. Куцова В. З., Елагин А. С., Свиначенко Е. И. Структура и свойства доэвтектических силуминов, модифицированных комплексом Ti-B-Sr // Металознавство та термічна обробка металів: Науков. Та інформ. Журнал, ПДАБА, Дн-ськ. 2011. № 1-2 (52-53). С. 310–318.
9. Куцова В. З. Елагин А. С. Коррозионная

стойкість сплава АК7ч после модифицирования и термовременной обработки в жидком и твердом состоянии // *Металознавство та термічна обробка металів*. 2012. №2(57). С. 40-43.

10. Куцова В. З. Елагин А. С. Влияние комплексного модифицирования, термической обработки в жидком состоянии на структуру и свойства сплава АК7ч // *Новини науки Придніпров'я, ДВНЗ ПДАБА*. 2012. №2. С. 13–16.

11. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. Пер. с англ. М. : Мир, 1972. 382с.

12. Dolzhanskyi A. M., Kutsova V. Z., Ayupova T. A., Storozhko K. D., Rybkin O. P. Foundry Aluminium Alloys Cold Rolling // *Металознавство та термічна обробка металів, Днепропетровск, ПГАСиА*. 2020. №1. P.55–61.

13. Dolzhanskyi A. M., Ayupova T. A., Nosko O. A., Rybkin O. P., Ayupov O. A. Transition from Engineering Strain to the True Strain in Analytical Description of Metals Hardening // *Металознавство та термічна обробка металів, Днепропетровск, ПГАСиА*. 2021. № 1. P. 66–70.

References

1. Stroganov, G. B. (1985). *Vysokoprochnye alyuminiyevye splavy* [High strength aluminum alloys]. Moskva: Metallurgiya, 1985

2. Kutsova, V. Z., & Aiupova, T. A. (2006). Vliyanie mikrolegirovaniya Sr i Sc na strukturu splava АК7ч [Effect of Sr and Sc microalloying on the structure of the АК7ч alloy]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie*, 36 (part 1), 201-209

3. Kutsova, V. Z., Aiupova, T. A., & Ambrazhej, M. Yu. (2007). Vliyanie mikrolegirovaniya Sr i Sc na fazovyy sostav i svoystva АК7ч [Effect of Sr and Sc Microalloying on the Phase Composition and Properties of АК7ч]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie*, 41 (part 1), 18-30

4. Taran, Yu .N., Kutsova, V. Z., Koval'chuk, M. G., & Uzlov, K. I. (1988) Struktura i fazovyy sostav siluminov, modifitsirovannykh stronciem [Structure and phase composition of silumins modified with strontium]. *Izvestiya vuzov. Cvetnaya metallurgiya*, (3), 78-84

5. Kutsova, V. Z., Shvets, O. V., & Ayupova, T. A. (2001). Modifikuvannya alyuminiyevih splaviv

[Modification of aluminum alloys]. "*МММ*", (1), 99-109

6. Beresina, A. I., Chuistov, K. V., & Monastyrskaya, T. A. (1999). The stability of structure states of Al-Mg, Al-Li-Mg alloys, alloyed by Sc, Zr and Hf. In: *Proc.of the 3rd European Conference on Light Alloys and Composites*. Zakopane, (Poland), 43-48

7. Dobatkina, T. V., Rokhlin, L. L., & Charakterova, M. L. (1999). Phase diagrams of the aluminum – base alloys containing scandium. In: *Proc.of the 3rd European Conference on Light Alloys and Composites*. Zakopane, (Poland), 55-60

8. Kutsova, V. Z., Elagin, A.S., & Svinarenko, E. I. (2011)/ Struktura i svoystva doevtekticheskikh siluminov, modifitsirovannykh kompleksom Ti-B-Sr [Structure and properties of hypoeutectic silumins modified with Ti-B-Sr complex]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*. (1-2), 310-318

9. Kutsova, V. Z., & Elagin, A. S. (2012). Korroziyonnaya stojkost' splava АК7ч после modifitsirovaniya i termovremennoy obrabotki v zhidkom i tverdom sostoyanii [Corrosion resistance of АК7ч alloy after modification and thermal treatment in liquid and solid state]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* (2), 40-43

10. Kutsova, V. Z., & Elagin, A. S. (2012). Vliyanie kompleksnogo modifitsirovaniya, termicheskoy obrabotki v zhidkom sostoyanii na strukturu i svoystva splava АК7ч [Influence of Complex Modification, Heat Treatment in Liquid State on the Structure and Properties of АК7ч Alloy]. *Novini nauki Pridniprov'ya*, (2), 13-16

11. Shenk, H. (1972). Teoriya inzhenernogo eksperimenta [Theory of engineering experiment]. Moskva: Mir

12. Dolzhanskyi, A. M., Kutsova, V. Z., Ayupova, T. A., Storozhko, K. D., & Rybkin O. P. (2020). Foundry Aluminium Alloys Cold Rolling. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*, (1), 55-61

13. Dolzhanskyi, A. M., Ayupova, T. A., Nosko, O. A., Rybkin, O. P., & Ayupov, O. A. (2021). Transition from Engineering Strain to the True Strain in Analytical Description of Metals Hardening. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*, (1), 66-70

Аюпова Тетяна Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна. ORCID ID 0000-0002-5706-4211. E-mail: tanyaaayupova@ukr.net

Носко Ольга Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук, декан факультету якості та інженерії

матеріалів, доцент кафедри покриттів, композиційних матеріалів і захисту металів, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна. ORCID ID 0000-0002-5749-7578. E-mail: olganosko30@gmail.com

Аюпов Олександр Альбертович, студент кафедри систем якості, стандартизації та метрології, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна. ORCID ID 0000-0002-1414-0835. E-mail: tk136@ua.fm

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛИВАРНОГО АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ В ГРАНИЧНО ДЕФОРМОВАНОМУ СТАНІ

Метою дослідження є вирішення актуальної задачі задоволення потреби машинобудування в алюмінієвих сплавах, що деформуються, за одночасної фактичної відсутності їх вітчизняного виробництва за рахунок розробки деформованого сплаву на основі ливарного сплаву АК7ч. Для досягнення поставленої мети необхідним є вивчення впливу мікролегування та умов кристалізації на структуроутворення гранично деформованого сплаву АК7ч для управління структурою та властивостями при розробці деформівних сплавів на основі АК7ч.

Методи. У роботі досліджували гранично деформовані доевтектичні силуміни на базі АК7ч з доданнями стронцію та скандію. Експеримент проводили за планом ортогональних латинських квадратів. Мікроструктуру вивчали на оптичному мікроскопі "Axiovert - 200MAT". Параметри кількісних характеристик структури визначали за стандартними методиками. Мікротвердість евтектики вимірювали на ПМТ-3 за ДСТУ ISO 6507-1:2007. Ідентифікацію фаз проводили методом фазового рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН - 3М у $Co_{K\alpha}$ фільтрованому випромінюванні. Із залученням розрахункової методики визначення граничного ступеня деформації при прокатці клиноподібних зразків вивчали залежність технологічної деформованості від хімічного складу сплаву на базі АК7ч та режиму водневої обробки його розплаву.

Результати. Визначено закономірності структуроутворення гранично деформованого ливарного алюмінієвого сплаву АК7ч. Отримано залежності параметрів структури дослідного сплаву в литому та гранично деформованому стані від вмісту елементів-модифікаторів та швидкості кристалізації. Встановлено суттєве підвищення параметра кристалічної решітки α -Al у деформованому стані порівняно з литим для всіх сплавів на основі АК7ч незалежно від мікролегування та швидкості кристалізації. У α -Al у деформованому стані збільшується розчинність скандію та заліза. Отримано залежності технологічної деформованості від складу сплаву АК7ч та режиму водневої обробки його розплаву. Встановлено підвищення деформованості сплаву на 60% при комплексному фізико-хімічному впливі мікролегування стронцієм, скандієм та водневої обробки розплаву протягом 20 хвилин порівняно з литим сплавом вихідного складу.

Наукова новизна. Вперше встановлено закономірності структуроутворення та формування комплексу механічних властивостей при спільному впливі Sr, Sc та швидкості кристалізації гранично деформованого доевтектичного сплаву АК7ч. Дані отримані для сплаву АК7ч при варіюванні вмісту стронцію 0...0,2%, скандію 0...0,5% та швидкості охолодження при кристалізації $6,67 \cdot 10^{-4} \dots 10^3$ град/с.

Практична цінність. У ході експерименту проведеного за планом ортогональних латинських квадратів оптимізували склад сплаву АК7ч, отримали інструмент на його структуроутворення, що забезпечує необхідний рівень механічних властивостей. Холодною деформацією прокаткою із заготівлі сплаву АК7ч (Sr, Sc) з максимальною товщиною 11 мм була отримана смуга завтовшки 2,4 мм. Справжня деформація металу АК7ч(Sr, Sc) після водневої обробки (протягом 20 хв) склала 1,19.

Ключові слова: доевтектичний силумін, мікролегування, гранична деформація.

Аюпова Татьяна Анатольевна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и термической обработки металлов, Украинский государственный университет науки и технологий, г. Днепр, Украина. ORCID ID 0000-0002-5706-4211. E-mail: tanyaayupova@ukr.net

Носко Ольга Анатольевна, доцент, кандидат технических наук, декан факультета качества и инженерии материалов, доцент кафедры покрытий, композиционных материалов и защиты металлов, Украинский государственный университет науки и технологий, г. Днепр, Украина. ORCID ID 0000-

0002-5749-7578. E-mail: olganosko30@gmail.com

Аюпов Александр Альбертович, студент кафедры систем качества, стандартизации и метрологии, Украинский государственный университет науки и технологий, г. Днепр, Украина. ORCID ID 0000-0002-1414-0835. E-mail: tk136@ua.fm

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛИТЕЙНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В ПРЕДЕЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

Целью исследования является решение актуальной задачи удовлетворения потребности машиностроения в деформируемых алюминиевых сплавах при одновременном фактическом отсутствии их отечественного производства за счет разработки деформируемого сплава на основе литейного сплава АК7ч. Для достижения поставленной цели необходимым является изучение влияния микролегирования и условий кристаллизации на структурообразование предельно деформированного сплава АК7ч для управления структурой и свойствами при разработке деформируемых сплавов на основе АК7ч.

Методы. В работе исследовали предельно деформированные доэвтектические силумины на базе АК7ч с добавками стронция и скандия. Эксперимент проводили по плану ортогональных латинских квадратов. Микроструктуру изучали на оптическом микроскопе «Ахіоvert – 200МАТ». Параметры количественных характеристик структуры определяли по стандартным методикам. Микротвердость эвтектики измеряли на ПМТ-3 по ДСТУ ISO 6507-1:2007. Идентификацию фаз проводили методом фазового рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН - 3М в $Co_{K\alpha}$ фильтрованном излучении. С привлечением расчетной методики определения предельной степени деформации при прокатке клиновидных образцов изучали зависимость технологической деформируемости от химического состава сплава на базе АК7ч и режима водородной обработки его расплава.

Результаты. Определены закономерности структурообразования предельно деформированного литейного алюминиевого сплава АК7ч. Получены зависимости параметров структуры опытного сплава в литом и предельно деформированном состоянии от содержания элементов-модификаторов и скорости кристаллизации. Установлено существенное повышение параметра кристаллической решетки α -Al в деформированном состоянии по сравнению с литым для всех сплавов на основе АК7ч независимо от микролегирования и скорости кристаллизации. В α -Al в деформированном состоянии увеличивается растворимость скандия и железа. Получены зависимости технологической деформируемости от состава сплава АК7ч и режима водородной обработки его расплава. Установлено повышение деформируемости сплава на 60% при комплексном физико-химическом воздействии микролегирования стронцием и скандием и водородной обработки расплава в течение 20 минут по сравнению с литым сплавом исходного состава.

Научная новизна. Впервые установлены закономерности структурообразования и формирования комплекса механических свойств при совместном воздействии Sr, Sc и скорости кристаллизации предельно деформированного доэвтектического сплава АК7ч. Данные получены для сплава АК7ч при варьировании содержания стронция 0...0,2%, скандия 0...0,5% и скорости охлаждения при кристаллизации $6,67 \cdot 10^{-4} \dots 10^3$ град/с.

Практическая ценность. В ходе эксперимента проведенного по плану ортогональных латинских квадратов оптимизировали состав сплава АК7ч, получили инструмент воздействия на его структурообразование, обеспечивающее требуемый уровень механических свойств. Холодной деформацией прокаткой из заготовки сплава АК7ч (Sr, Sc) с максимальной толщиной 11 мм была получена полоса толщиной 2,4 мм. Истинная деформация сплава АК7ч (Sr, Sc) после водородной обработки (в течение 20 мин) составила 1,19.

Ключевые слова: доэвтектический силумин, микролегирование, предельная деформация.

Tetyana Aiupova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine. ORCID ID 0000-0002-5706-4211. E-mail: tanyaaiupova@ukr.net

Olha Nosko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Coatings, composite

materials and metal protection, Dean of Faculty of Quality and Material Engineering, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine. ORCID ID 0000-0002-5749-7578. E-mail: olganosko30@gmail.com

Oleksandr Aiupov, Student of the Department of Quality Systems, Standardization and Metrology, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine. ORCID ID 0000-0002-1414-0835. E-mail: tk136@ua.fm

FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CAST ALUMINUM ALLOY IN THE EXTREMELY DEFORMED STATE

The purpose of the study is to solve the urgent problem of satisfaction the needs of mechanical engineering in deformable aluminum alloys with the simultaneous actual absence of their domestic production through the development of deformable alloy based on foundry alloy AK7h. To achieve this goal, it is necessary to study the effect of microalloying and crystallization conditions on the structure of the extremely deformed alloy AlSi7 to control the structure and properties in the development of deformable alloys based on AK7h.

Methods. Extremely deformed hypo-eutectic AlSi7 based alloys with strontium and scandium additives were studied in this work. The experiment was performed according to the plan of Orthogonal Latin squares. The microstructure was studied on an Axiovert - 200MAT optical microscope. The parameters of the quantitative characteristics of the structure were determined by standard methods. The microhardness of the eutectic was measured on PMT-3 according to ДСТУ ISO 6507-1: 2007. Phase identification was carried out by the method of phase X-ray diffraction analysis on a DRON-3M diffractometer in $Co_{K\alpha}$ filtered radiation. The dependence of the technological deformability on the chemical composition of the AlSi7 based alloys and the hydrogen melt treatment regime was studied using the calculation method for determining the maximum degree of deformation during rolling of wedge-shaped samples.

Results. The regularities of structure formation of the extremely deformed cast aluminum AlSi7 based alloy are determined. The dependences of the structure parameters of the experimental alloy in the cast and ultimate deformed state on the content of modifier elements and the crystallization rate are obtained. A significant increase in the crystal lattice parameter of α -Al in the deformed state compared to the cast state was established for all alloys based on AlSi7, regardless of microalloying and crystallization rate. In α -Al in the deformed state, the solubility of scandium and iron increases. The dependences of the technological deformability on the composition of the AlSi7 alloy and the regime of hydrogen melt treatment are obtained. An increase in the deformability of the alloy by 60% was established under the complex physicochemical effect of microalloying with strontium and scandium and hydrogen melt treatment for 20 minutes compared to the cast alloy of the initial composition.

Originality. For the first time, regularities of structure formation and formation of a complex of mechanical properties under the combined action of Sr, Sc and the crystallization rate of the ultimate deformed hypo-eutectic alloy AlSi7 have been established. The data were obtained for the AK7ch alloy by varying the content of strontium 0...0.2%, scandium 0...0.5% and the cooling rate during crystallization $6.67 \cdot 10^{-4} \dots 10^3$ deg/s.

Practical value. In the experiment carried out according to the plan of Orthogonal Latin squares, the composition of the AK7ch alloy was optimized, and a instrument was obtained to influence its structure formation, providing the required level of mechanical properties. A strip 2.4 mm thick was obtained by cold rolling from a billet of AlSi7 (Sr, Sc) alloy with a maximum thickness of 11 mm. The true strain of the AlSi7(Sr, Sc) alloy after hydrogen melt treatment (for 20 min) is 1.19.

Key words: hypo-eutectic AlSi alloy, microalloying, ultimate deformation.

Рукопис надійшов 02.08.2021 р.