УДК:669.018.28:546.631:546.831

В. О. Щерецький, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
e-mail: rnmptima@ukr.net

Yi Jianglong^{*}, наук. співр., wangxx@gwi.gd.cn

А. А. Чайка^{**}, канд. техн. наук, ст. наук. співр.

В. К. Юлюгін^{**}, канд. техн. наук, ст. наук. співр.

О. І. Дем'янов^{**}, заст. зав. відділу

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

^{*}Guangdong Welding Institute of GDAS (China)

^{**}Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)

ВПЛИВ СУМІСНОГО МОДИФІКУВАННЯ СКАНДІЄМ ТА ЦИРКОНІЄМ НА ЛИВАРНІ ВЛАСТИВОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Al–Mg–Cu

Досліджено спільний вплив добавок скандію і цирконію на міжфазну взаємодію і рідинноплинність розплавів системи Al–Mg–Cu, близьких за складом до тих, що застосовуються в якості присадних матеріалів при зварюванні листів з деформованих сплавів алюмінію. Формування структури різних зон звареного з'єднання відбувається в нерівноважних умовах. Швидкість охолодження металу шва може варіюватися в широких межах залежно від способу і режиму зварювання. Короткочасність нагріву при зварюванні призводить до особливих структурних перетворень в зоні термічного впливу, викликає знеміцнення основного металу і зниження рівня механічних властивостей в цілому. Одним із основних способів вирішення проблеми знеміцнення, при термічних впливах в процесі з'єднання алюмінієвих сплавів, є їх модифікування скандієм і цирконієм. Разом з тим, вплив цих модифікаторів на характеристики розплаву і зокрема ливарні властивості для систем алюмінієвих сплавів, що містять в якості легуючих добавок мідь і магній, вивчено недостатньо, а наявна інформація має суперечливий характер. Тоді як рідинноплинність, як здатність розплаву розтікатися і рівномірно заповнювати простір стику двох поверхонь при зварюванні, є важливою технологічною характеристикою, що дозволяє формувати тіло зварного шва без каверн і пустот. Встановлено вплив модифікування скандієм і цирконієм в кількості до 0,75 %мас. на рідинноплинність, лінійну усадку та тріщиностійкість. Показано, що загальне підвищення теплоти кристалізації пов'язане з утворенням нових фаз в наслідок модифікування, є основним чинником підвищення рідинноплинності розплаву, незалежно від підвищення його в'язкості пов'язаної з появою дисперсних включень зародків в розплаві. Істотне підвищення тріщиностійкості при комплексному модифікуванні скандієм і цирконієм пов'язане з розподілом усадки виливку та кількість первинної інтерметалідної фази при доевтектичних кількостях модифікатора.

Ключові слова: деформовані алюмінієві сплави, скандій, цирконій, модифікування, рідинноплинність, тріщиностійкість, зварювання алюмінію.

Відомо, що модифікатори алюмінієвих зварювальних сплавів на основі скандію і цирконію дозволяють поліпшити механічні характеристики алюмінієвих сплавів. Алюмінієві деформовані сплави (система Al–Mg–Cu) характеризуються хорошим
ISSN 0235-5884. Процеси лиття. 2020. № 3 (141)

поєднанням механічних властивостей: мала щільність, досить високий модуль пружності і питома міцність. Процес зварювання деформованих алюмінієвих сплавів відрізняється складністю фазових і структурних перетворень, як на етапі зварювання, так і наступній термічній обробці. Формування структури різних зон зварного з'єднання відбувається в нерівноважних умовах. Швидкість охолодження металу шва може варіюватися в широких межах залежно від способу і режиму зварювання. Короткочасність нагріву при зварюванні призводить до особливих структурних перетворень в зоні термічного впливу, викликає знеміцнення основного металу і зниження рівня механічних властивостей в цілому. Одним із основних способів вирішення проблеми знеміцнення, при термічних впливах в процесі з'єднання алюмінієвих сплавів, є їх модифікування скандієм і цирконієм, які формують високотемпературні інтерметалідні фази і подрібнюють структуру шва, діючи як модифікатор 2го роду [1].

Разом з тим, вплив цих модифікаторів на характеристики розплаву і зокрема ливарних властивостей для систем алюмінієвих сплавів, що містять в якості легуючих добавок мідь і магній, вивчено недостатньо, а наявна інформація має суперечливий характер. Тоді як рідинноплинність, як здатність розплаву розтікатися і рівномірно заповнювати простір стику двох поверхонь при зварюванні, є важливою технологічною характеристикою, що дозволяє формувати тіло зварного шва без каверн і пустот. Згідно термодинамічної теорії кристалізації параметри структури сплавів істотно залежать від умов кристалізації, тому керуючи ними можна впливати на якісні характеристики зварних з'єднань.

Метою даної роботи є дослідження спільного впливу добавок скандію і цирконію на міжфазну взаємодію і рідинноплинність розплавів системи Al–Mg–Cu, близьких за складом до тих, що застосовуються в якості присадних матеріалів при зварюванні листів з деформованих сплавів алюмінію.

За відомими даними [2, 3] модифікування Al–Mg сплавів, запропоноване ще в 1971, дає сильний ефект подрібнення структури і підвищення властивостей при додаванні десятих часток модифікатора, разом з рідкоземельними і перехідними елементами значну роль відіграють скандій, цирконій, гафній, титан, перехідні метали IV групи (титан, цирконій) [4, 5], але дія скандію є сильнішою. При додаванні до алюмінієвих сплавів 0,3–0,4 %мас. скандію мікроструктура виливків має дрібну структуру з величиною зерна 15–40 мкм, навіть в литому стані без термічної обробки [6]. Причиною цього є утворення інтерметаліду Al_3Sc , який має кубічну ґратку типу $L1_2$ з періодом 0,410 нм, близьким до періоду гранецентрованої кубічної ґратки алюмінію (0,405 нм). Тому зародки інтерметаліду Al_3Sc є ефективними центрами зародження кристалів твердого розчину алюмінію і забезпечують значний ефект модифікування при кристалізації розплаву. Твердий розчин скандію в алюмінії має концентрацію (0,3 %мас.) при 655 °C – температурі евтектичного перетворення: $P \leftrightarrow \alpha-Al + Al_3Sc$, (точка евтектичного перетворення Al–0,55%мас.Sc) але вже при 500 °C концентрація скандію в твердому розчині алюмінії складає 0,05 %мас. Саме тому вважається [7], що ефективно модифікує литу структуру добавка модифікатора скандію в кількості $\geq 0,55$ %мас. Але ця концентрація може бути зменшена при наявності інших легуючих елементів, таких як цирконій [8]. Діаграма стану системи Al–Zr [9], відноситься до систем перитектичного типу. Перитектична реакція відбувається при температурі 660,5 °C між рідиною, що містить 0,11 %мас. цирконію, і з'єднанням $ZrAl_3$ з утворенням твердого розчину алюмінію 0,28%мас.Zr. Стабільне з'єднання $ZrAl_3$ має тетрагональну ґратку з періодами $a = 4,306$ А, $c = 16,90$ [10]. І головне, цирконій знижує загальну концентрацію скандію в твердому розчині алюмінію, знижує дифузійну рухливість металів в твердому розчині алюмінію і може частково ізоморфно замішувати скандій інтерметаліди Al_3Sc , формуючи $Al_3(Zr)Sc$ [11].

Робота виконана з застосуванням стандартних і оригінальних методик досліджень, сучасного лабораторного та аналітичного обладнання. Для аналізу структури досліджених матеріалів застосовували рентгеноструктурний аналіз, дифрактометр

Затвердіння сплавів

ДРОН-3М, а також мікрозондовий рентгеноструктурний елементний аналіз на приладах MS-46 «CAMECA» і JEOL JSM – 6700F. Термічні дослідження проводили за оригінальною методикою на приладі синхронного термічного аналізу STA 449F1 фірми Netzsch з застосуванням програмного пакету Proteus.

Для вивчення впливу молифікування на ливарні властивості і тріщиностійкість сплавів модифікування сплавів системи Al–Mg–Cu скандієм і цирконієм було виплавлено модельні зразки сплавів, їх хімічний склад контролювали методом рентгеноспектрального аналізу. Для виготовлення дослідних сплавів використовували алюміній марки А95, первинний магній Мг90, мідь безкисневу М00б, лігатуру Al–Sc2,1%мас., лігатуру Al–Zr8%мас. Кількість домішок планували менше 0,05 %, склади вихідних матеріалів представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні шихтові матеріали

Марка	Al, баланс	Домішки, %мас.					
		Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Разом
A95	99,95	0,025	0,020	0,010	0,005	0,002	0,05
Mг90	99,9	0,04	0,009	0,004	–	–	0,1
M00	99,99	0,001	–	–	0,001	–	0,01

Розрахунок шихти проводили з урахуванням коефіцієнтів засвоєння різних елементів для схеми виплавки сплаву в індукційній печі. Температурний режим виплавки сплавів вибирали з урахуванням їх хімічного складу і необхідності повного розчинення інтерметаллідної фази Al_3Sc , що міститься в лігатурі, температура нагріву розплаву в печі становила 760–780 °С, температура розливання – 700–720 °С.

За результатами термічних досліджень встановили, що дослідні сплави Al–6Cu–0,5Sc і Al–10Mg–0,5Sc мають два етапи плавлення, і відповідно, кристалізації евтектики і твердого розчину. Сплав складу Al–4,5Cu–1,5Mg–0,5Sc–0,25Zr має три етапи: після кристалізації твердого розчину тверднуть ще дві евтектики, які послідовно кристалізуються за схемою $P \rightarrow \alpha + CuAl_2$ (548 °С) і $P \rightarrow \alpha + CuAl_2 + CuMgAl_2$ (507 °С). У процесі охолодження розплавленого зразка на діаграмі виявлено один перегин, незначний за обсягом в інтервалі температур 720–700 °С. Для сплаву Al–4Cu–1,5Mg–0,5Sc–0,25Zr спостерігається два перегини при температурах 710 і 670 °С, що дозволяють припустити можливість утворення первинних виділень алюміній-скандієвих фаз $Al_3(Zr)Sc$ і евтектичного перетворення $P \rightarrow Al + Sc(Zr)Al_3$ при 655 °С. Можливість утворення алюмінієво-скандієвих евтектики може бути причиною деякого підвищення температури солідус на завершальному етапі кристалізації сплавів зі скандієм, так як обсяг основної евтектики в сплавах цієї системи невеликий, а алюміній-скандієвої евтектики – ще менший. На рис. 1 показано вид ДСК кривих синхронного термічного аналізу до обробки даних, а в табл. 2 наведено встановлені температурні параметри плавлення і кристалізації досліджених модельних сплавів.

Таким чином, введення скандію і цирконію в сумарній кількості більше евтектичної точки Al–Sc з одного боку збільшує інтервал кристалізації сплаву, що має зменшувати його ливарні властивості, а з іншого – підвищує температуру солідусу сплаву.

Невід'ємною складовою технологічних властивостей металевих матеріалів є їх ливарні властивості, серед яких особливе місце займає рідинноплинність. Головним вимірюваним параметром при дослідженні на ріднноплинність є довжини заповненої ділянки проби, що істотно залежить від методики дослідження, тому рідинноплинність слід розглядати як інтегральний показник властивостей рідкого металу, обумовлених його складом. Так, більш високі показники теплоти кристалізації сплавів визначають їх більш високу рідинноплинність, завдяки більш низькій швидкості охолодження металу в формі і відповідно більшого терміну перебування металу в рідкому стані. Одним з

Рис. 1. ДСК криві плавлення сплавів: а – Al–4Cu–1,5Mg–0,5Sc–0,25Zr;
б – Al–6,5Cu–0,2Zr–0,5Sc; в – Al–10Mg–0,5Sc

Таблиця 2

Результати термічного ДСК аналізу

Сплав	Плавлення, °С		Кристалізація, °С		
	зони				
Al-4Cu-1,5Mg+0,5Sc +0,25 Zr	528-551 570-589	593-672	709	671	622-571 499-502 470-478
Al-6Cu+0,5Sc	522	579-672	715	621-568	510-500
Al-10Mg+0,5Sc	500 (490)	520-642	710	593-552	461-453

ефективних способів дослідження рідинноплинності є вдосконалена методика [12], яка передбачає використання комплексної U-подібної проби Нехендзі-Купцова, що включає контроль температури в заливальній воронці і на вході бічного U подібного каналу з додатковою теплоізоляцією прибуткової частини форми (рис. 2).

Так за даними ДСК аналізу введення скандію і цирконію розширює інтервал кристалізації алюмінієвих сплавів системи Al-Mg-Cu, що теоретично має істотно вплинути на рідинноплинність розплаву. Результати досліджень ливарних властивостей свідчать, що наявність скандію, навіть в доєвтектичних кількостях (менше 0,3 %мас.), практично в два рази зменшує лінійну усадку модельного сплаву Al4%Cu1,5Mg за рахунок об'ємної кристалізації, викликаній додатковими центрами кристалізації. З іншого боку, сплав, модифікований тільки скандієм, поступається по тріщиностійкості сплаву комплексно модифікованому скандієм і цирконієм при аналогічній сумарній кількості до 0,3 %мас. (табл. 3). Коли сумарна кількість модифікуючої добавки цирконію і скандію перевищує 0,3 %мас., первинні кристали мають компакту форму і розміри менше 1 мкм. Разом невеликі розміри зародків кристалів і їх компактна морфологія зміщують температурну границю нульової рідинноплинності до лінії солідусу, тому при виділенні навіть великої кількості первинних кристалів і відсутності зв'язку між первинними кристалами і формуванням дендритної структури, розплав продовжує текти. Відповідно, зниження концентрації цирконію і скандію в зону твердого розчину викликає збільшення розмірів первинних інтерметалідів з утворенням розгалуженої структури, що негативно впливає на ливарні характеристики.

Таблиця 3

Результати дослідження ливарних характеристик сплавів

Сплав	Ливарна усадка		Ураження тріщинами, мм				
	абсолютна	відносна	по ділянкам				сума
	мм	%	I	II	III	IV	
Al4%Cu1,5%Mg	7.43	5.31	—	1,96	—	—	1,96
Al4%Cu1,5%Mg0,5%Sc	3.57	2.55	—	—	—	—	—
Al4%Cu1,5%M0,75%Sc	3.5	2.5	—	—	—	—	—
Al4%Cu1,5%Mg0,3%Sc	5.32	3.08	—	0,98	—	—	0,98
Al4%Cu1,5%Mg0,15%Sc0,15%Zr	3.65	2.61	—	—	—	—	—
Al4%Cu1,5%Mg0,3%Sc0,2%Zr	3.63	2.59	—	—	—	—	—
Al4%Cu1,5%Mg0,5%Sc0,25%Zr	3.46	2.47	—	—	—	—	—

Рис. 2. Креслення комплексної форми Ніхендзі-Купцева (а) та вигляд виливки в формі (б)

Висновки

- Введення комплексного модифікатора цирконію плюс скандій, навіть в незначних кількостях (до 0,3 %мас.), до складу сплавів системи Al–Mg–Cu призводить до значного підвищення ліквідус сплаву. Тому, для його розтікання і заповнення порожнини зварювального зазору, нагрів розплаву необхідно вести при температурах близьких до 800 °С. Така висока температура потрібна для гарантованого розчинення інтерметалідів цирконію і скандію, що в якості зародків можуть формувати, (навіть при прискорених швидкостях охолодження (≥ 70 град/сек) первинні кристали Al_3Zr або $Al_3(Zr)Sc$ великих розмірів відносно евтектичної фази.

- Додаткові піки на ДСК кривій кристалізації, що пов'язані з утворенням нових фаз в наслідок модифікування, призводить до загального підвищення теплоти кристалізації, що є основним чинником підвищення рідинноплинності розплаву, незалежно від збільшення його в'язкості пов'язаної з появою дисперсних включень зародків в розплаві.

- Позитивний вплив цирконію на зварюваність пов'язаний з підвищенням пластичності в твердо-рідкому стані при температурах вище нерівноважного солідусу. Зменшення дифузійної рухливості атомів, внаслідок підвищення температури рекристалізації, через зменшення швидкості розпаду твердого розчину при старінні, сприяє підвищенню жароміцності алюмінієвих сплавів. Тим самим підсилюючи комплексний вплив скандію на властивості алюмінієвого сплаву: підвищення меж текучості і міцності, зменшення розміру зерен в литому стані, підвищення температури рекристалізації пов'язаною з закріпленням субграниць дисперсними частинками інтерметалідної фази. Істотне підвищення тріщиностійкості модифікованих сплавів навіть не великими сумарними добавками скандію і цирконію можна пояснити як

об'ємним розподілом усадки, так і впливом добавки цирконію в алюмінії на схильність утворювати пересичі тверді розчини, що зменшує кількість первинної інтерметалідної фази, при доєвтектічних кількостях модифікатора. А також, впливом цирконію на механічні властивості твердого розчину алюмінію, так як запас пластичності сплаву визначається діапазоном температурного інтервалу крихкості, величиною відносного подовження в цьому інтервалі і лінійної усадкою, заміна міді цирконієм в твердому розчині алюмінію призводить до підвищення пластичності сплаву, зниження лінійної усадки і як наслідок підвищенню тріщиностійкості.

Список літератури

1. Guo, Y., Zhao, N., Shi, C. et al. Combined Effects of Pre-deformation and Pre-aging on the Mechanical Properties of Al–Cu–Mg Alloy with Sc and Zr Addition. *J. Wuhan Univ. Technol. Mat. Sci. Edit.*, 2018, 33, p. 680–687.
2. Филатов Ю. А. Развитие представлений о легировании скандием сплавов Al–Mg. *Технология легких сплавов*, 2015, № 2, С. 19–22.
3. Aluminum scandium alloy: патент US3619181 A: МПК51 С 22 С 21/00. Willey L. A.; заявитель и патентообладатель Aluminum Co Of America. 771669; заявл. 29.10.1968; опубл. 09.11.1971.
4. Лямихов Л. К., Самсонов Г. В. О модифицировании алюминия и сплава А7 переходными металлами. *Цветные металлы*, № 8, 1964, с. 72–82.
5. Захаров В. В. Устойчивость твердого раствора скандия в алюминии. *МиТОМ*, № 2. 1997, С. 15–20.
6. Елагин В. И., Захаров В. В., Ростова Т. Д. Перспективы легирования алюминиевых сплавов скандием. *Цветные металлы*, № 12, 1982, с. 96–99.
7. Hyde K. B., Norman A. F., Prangell P. B. The effect of cooling rate on the morphology of primary Al₃Sc intermetallic particles in Al–Sc alloys. *Acta Mater.* 2001, vol. 49, pp. 1327–1337.
8. Мильман Ю. В. Влияние скандия на структуру, механические свойства и сопротивление коррозии сплавов алюминия: *Прогрессивные материалы и технологии: сб. трудов в 2-х томах*. К.: Академперіодика, 2003. Т.1. С. 335–360.
9. Лякишев Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. М.: Машиностроение, 1996–2000 гг.
10. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов: перевод с английского. М.: Металлургия, 1979. 483с.
11. H. Bo, L.B. Liu, J.L. Hu, Z.P. Jin (2017) Experimental study and thermodynamic modeling of the Al–Sc–Zr system. *Computational Materials Science*, vol. 133, pp. 82–92
12. Ляхненко В. Л., Щерецкий А. А., Апухтин В. В., Гаврилюк К. В., Щерецкий В. А. Методологические аспекты определения жидкотекучести сплавов с существенно отличающимися теплофизическими характеристиками. *Процессы литья*. 2004. № 4. С. 38–41.

Надійшла 15.07.2020

Дану роботу виконано в рамках проекту, який реалізовується в межах двостороннього договору про науково-технічне співробітництво між Урядом України та Урядом Китайської Народної Республіки (CU03-08) та технічного проекту провінції Гуандун (20180508).

References

1. Guo, Y., Zhao, N., Shi, C. (2018) Combined Effects of Pre-deformation and Pre-aging on the Mechanical Properties of Al–Cu–Mg Alloy with Sc and Zr Addition. *J. Wuhan Univ. Technol. -Mat. Sci. Edit.* 33, pp. 680–687 [in English].
2. Filatov, Yu. A. (2015) Development of ideas about scandium alloying Al–Mg alloys/Yu. A. Filatov // *Tekhnologiya legkikh splovov*. No 2, pp. 19–22 [in Russian].
3. Willey L. A Aluminum scandium alloy. Patent US3619181 A: МПК51 С 22 С 21/00; owner Aluminum Co Of America. 771669 [in English].
4. Lyamikhov L. K., Samsonov G. V. (1964) About the modification of aluminum alloy А7 by transition metals. *Czvetny'e metally*, no. 8, pp. 72–82 [in Russian].
5. Zakharov V. V. (1997) Stability of scandium solid solution in aluminum. *MITOM*, no.2, pp. 15–20 [in Russian].

6. Elagin V. I., Zakharov V. V., Rostova T. D. (1982) Prospects for alloying aluminum alloys with scandium. *Czvetny'e metally*, no. 12, pp. 96–99. [in Russian].
7. Hyde K. B., Norman A. F., Prangell P. B. (2001) The effect of cooling rate on the morphology of primary Al_3Sc intermetallic particles in Al-Sc alloys. *Acta Mater*, vol. 49, pp. 1327–1337 [in English].
8. Mil'man Yu. V. (2003) Scandium on the structure, mechanical properties, and corrosion resistance of aluminum alloys: *Progressive materials and technologies: collection of articles in 2 volumes*. K.: Akadempriodika, vol. 1, pp. 335–360 [in Russian].
9. Lyakishev N. P. (1996–2000) Phase diagrams of binary metal systems. M.: Mashinostroenie, in 3 Volumes. [in Russian]
10. Mondol'fo L. F. (1979) Structure and properties of aluminum alloys. M.: Metallurgiya. 483 p [in Russian].
11. H. Bo, L. B. Liu, J. L. Hu, Z. P. Jin, (2017) Experimental study and thermodynamic modeling of the Al-Sc-Zr system. *Computational Materials Science*, vol. 133, pp. 82–92 [in English].
12. Lakhnenko V. L., Shhereckij A. A., Apukhtin V. V., Gavriluk K. V., Shhereckij V. A. (2004) Methodological aspects of determining the fluidity of alloys with significantly different thermo-physical characteristics. *Casting processes*, no 4, pp. 38–41. [in Russian].

Received 15.07.2020

V. O. Sheretskiy, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, e-mail: rnmptima@ukr.net

Yi Jianglong*, Research Scientist

A. A. Chaika**, PhD (Engin.), Senior Research Scientist,

V. K. Yulyugin**, PhD (Engin.), Senior Research Scientist,

O. I. Demjanov**, Deputy Head of Department

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

*Guangdong Welding Institute of GDAS (China)

**E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

THE EFFECT OF CO-MODIFICATION BY SCANDIUM AND ZIRCONIUM OF ALUMINUM ALLOYS OF THE Al–Mg–Cu SYSTEM ON THE CASTING PROPERTIES

The joint effect of scandium and zirconium additives on the interfacial interaction and fluidity of Al–Mg–Cu system melts, similar in composition to those used as filler materials for wrought aluminum alloys, is investigated. The structure formation of various zones of the welding joints occurs via nonequilibrium conditions. The cooling rate of the weld metal varies widely depending on welding method and mode. The short term welding heatings lead to special structural transformations in the heat-affected zone, causes softening of the base metal and a decrease in its mechanical properties. One of the main ways to solve the problem of softening during thermal stresses in the process of aluminum alloys joining is to modify their structure with scandium and zirconium. At the same time, the influence of these modifiers on the characteristics of the melt and in particular the casting properties of aluminum alloy systems containing copper and magnesium has not been studied enough, and the available information is contradictory. The fluidity is the ability of the melt to spread and evenly fill the space at the junction of two surfaces during welding, so it is an important technological characteristic that allows one to form the body of the weld without shells voids and other defects. The effect of scandium and zirconium modification in an amount up to 0,75 wt. % on fluidity, linear shrinkage, and crack resistance was investigated. It was shown that the overall increase in the heat of crystallization associated with the formation of new phases as a result of modification is the main factor in increasing the fluidity of the melt, regardless of the increase in its viscosity, due to the appearance of dispersed inclusions of nuclei in the liquid. A significant increase in crack resistance during co-modification with scandium and zirconium is associated with the distribution of shrinkage of the casting and the number of inclusions of the primary intermetallic phases with under eutectic amounts of the modifier.

Keywords: wrought aluminum alloys, scandium, zirconium, modification, fluidity, crack resistance, aluminum welding.

This work was supported by the project of Inter-Governmental S&T Cooperation (CU03-08), and the technical project of Guangdong (20180508).