

УДК 669.715

Исследование влияния титана на структуру и свойства кальцийсодержащих алюминиевых сплавов

Наумова Евгения Александровна^(*)jan73@mail.ru
SPIN-код: 9024-3813

Бобрышева Арина Олеговна

arinkuz698@gmail.com

Беликов Павел Иванович

belka2000belikov@yandex.ru

Качанова Милана Александровна

kacanovamilana@gmail.com

НИТУ МИСИС, Москва, Россия

Аннотация. С помощью расчетных и экспериментальных методов (Thermo-Calc) исследованы сплавы Al-(2;4;7)%Ca-(0,5;1,0;1,5)%Ti. Эвтектика во всех сплавах имеет высокодисперсное строение. В заэвтектических сплавах с помощью МРСА и РФА установлено наличие тройного соединения, имеющего формулу $\text{CaTi}_2\text{Al}_{20}$ структурный тип cF184/1 с периодом решетки $A=1,4731$ нм. Первичные кристаллы $\text{CaTi}_2\text{Al}_{20}$ в заэвтектических сплавах имеют компактную хлопьевидную морфологию и равномерно распределены на фоне дисперсной эвтектики. Выбранные сплавы предположительно оптимального состава Al-4Ca-0,2Ti и Al-7Ca-0,2Ti, прокатанные при температуре 500 °C со степенями обжатия более 85 % при испытаниях на растяжение показали следующие механические свойства: предел прочности 134 и 193 МПа соответственно, относительное удлинение 24 и 22 % соответственно.

Ключевые слова: сплавы системы Al–Ca–Ti, фазовый состав, микроструктура, интерметаллиды, эвтектика, прокатка, механические свойства

Investigation of the effect of titanium on the structure and properties of calcium - containing aluminum alloys

Naumova Evgeniia Alexandrovna^(*)jan73@mail.ru
SPIN-code: 9024-3813

Bobrysheva Arina Olegovna

arinkuz698@gmail.com

Belikov Pavel Ivanovich

belka2000belikov@yandex.ru

Kachanova Milana Alexandrovna

kacanovamilana@gmail.com

NUST MISIS, Moscow, Russia

Abstract. Al-(2;4;7)%Ca-(0.5;1.0;1.5)%Ti alloys have been studied using computational and experimental methods (Thermo-Calc). The eutectic in all alloys has a highly dispersed structure. In hypereutectic alloys, the presence of a ternary compound with the formula $\text{CaTi}_2\text{Al}_{20}$ of the structural type cF184/1 with a lattice period of $A=1.4731$ nm has been established using EMPA and X-ray phase analysis. Primary $\text{CaTi}_2\text{Al}_{20}$ crystals in hypereutectic alloys have a compact flake-like morphology and are evenly distributed against the background of dispersed eutectic. The selected alloys of the presumably optimal composition Al-4Ca-0.2 Ti and Al-7Ca-0.2 Ti, rolled at 500 °C with compression degrees of more

than 85% during tensile testing, showed the following mechanical properties: tensile strength 134 MPa and 193 MPa, respectively, elongation 24% and 22%, respectively.

Keywords: alloys of the Al–Ca–Ti system, phase composition, microstructure, intermetallics, eutectic, rolling, mechanical properties

Введение. Исследованию алюминиево-кальциевых сплавов в последнее десятилетие уделяется большое внимание [1]. Их основное преимущество заключается в универсальной технологичности — они имеют литейные свойства на уровне марочных силуминов, но, благодаря высокодисперсной литой структуре, поддаются горячей деформации с высокими степенями обжатия. Для получения тонкой структуры с равномерно распределенными округлыми частицами интерметаллидных фаз на фоне пластичной алюминиевой матрицы достаточно непродолжительного отжига отливок, не превышающего 3–5 часов [2]. Однако большинство алюминиево-кальциевых сплавов относятся к сплавам средней прочности, поэтому необходим поиск путей повышения комплекса их механических свойств. Одним из эффективных способов повышения свойств алюминиевых сплавов является измельчение зерна. Для этого применяется два типа модификаторов: тугоплавкие частицы (Ti, Zr, V, TiC, TiB₂ и др.) и поверхностно-активные элементы (Na, Sr, Sb, Ba и др.) [3]. Поскольку алюминиево-кальциевые сплавы конструкционного назначения исследуются сравнительно недавно, информации о тройных Al–Ca–X и более сложных диаграммах состояния в литературе недостаточно. В частности, практически не исследована тройная система Al–Ca–Ti [4]. При легировании алюминиево-кальциевых сплавов необходимо учитывать сложное распределение третьих легирующих элементов между алюминиевым твердым раствором и соединением Al₄Ca [1]. Поэтому целью данной работы являлось исследование сплавов системы Al–Ca–Ti, включающее изучение фазового состава и структуры сплавов в литом состоянии, выбор сплавов оптимального состава и оценка их деформируемости в процессе горячей прокатки, определение механических свойств.

Материалы и методы. Сплавы системы Al–Ca–Ti плавил в электрической печи GRAFICARBO, образцы получали в виде плоских слитков с размерами 15×30×180 мм литьем в графитовую изложницу. Составы сплавов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Составы экспериментальных сплавов системы Al–Ca–Ti (по шихте)

№	Al	Ca	Ti		№	Al	Ca	Ti
1	Основа	2	0,5		7	Основа	7	0,5
2		2	1,0		8		7	1,0
3		2	1,5		9		7	1,5
4		4	0,5		10		7	0,2
5		4	1,0		11		4	0,2
6		4	1,5		–		–	–

Микроструктуру литых и термообработанных образцов изучали на оптическом микроскоп Olympus GX51 (ОМ) и сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 (СЭМ). Микроскоп TESCAN, укомплектованный энергодисперсионной приставкой-микроанализатором производства Oxford Instruments и программным обеспечением AZtec, также использовали для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Для приготовления шлифов применяли как механическую, так и электролитическую полировку, которую проводили при напряжении 12 В в электролите, содержащем 75 % C_2H_5OH , 12,5 % $HClO_4$ и 12,5 % глицерина. Для расчета фазового состава использовали программу Thermo-Calc (база данных TCAL4). Рентгеноструктурный анализ проводили на приборе Bede D1 System (Bruker, Карлсруэ, Германия) с $Cu K\alpha$ -излучением ($\lambda = 0,15406$ нм) и обрабатывали в программном пакете. Твердость измеряли по методу Виккерса (HV) на твердомере Wilson Wolpert 930 N, при нагрузке 50 Н. Измерения удельной электрической проводимости были проведены с помощью вихретокового структуроскопа ВЭ-26НП. Горячую прокатку осуществляли на лабораторном стане 260. Тип стана Дуо, реверсивный, максимальная ширина проката 250 мм, скорость прокатки 0,2 м/с. Предел прочности и относительное удлинение прокатанных образцов определяли по ГОСТ1497–84 на универсальной испытательной машине FP100/1.

Результаты. Сплавы выбирали на основе расчетов элементов диаграмм состояния с помощью программного комплекса Thermo-Calc — проекций поверхностей ликвидус и солидус, политермических и изотермических разрезов, кривых неравновесной кристаллизации и др. У всех сплавов узкие интервалы кристаллизации, что предполагает высокие литейные свойства (рис. 1). Микроструктура сплава Al–7Ca–1Ti представлена на рис. 2 (в качестве примера). Помимо дендритов (Al) и высокодисперсной эвтектики, в сплавах содержатся светлые кристаллы грубой морфологии и серые кристаллы хлопьевидной компактной формы. С помощью МРСА было установлено, что белые кристаллы являются соединением Al_3Ti , а серые хлопьевидные кристаллы содержат и кальций, и титан.

Методом РФА было установлено, что это соединение имеет формулу $CaTi_2Al_{20}$ структурного типа cF184/1 с периодом решетки $A=1,4731$ нм (табл. 2). Это соединение отсутствует в базе данных Thermo-Calc. В алюминиевом твердом растворе титана содержится не более 0,02–0,06 масс.%. Эвтектика во всех сплавах самая высокодисперсная из всех видов эвтектических структур алюминиево-кальциевых сплавов. Все сплавы, содержащие 0,5 % Ti можно отнести к перспективным «естественным композитам» с мелкими хлопьевидными первичными кристаллами на фоне высокодисперсной эвтектики. Количество грубых кристаллов Al_3Ti в структуре этих сплавов невелико и их толщина не более 1–2 мкм, а длина не более 10–15 мкм. Твердость сплавов в основном зависит от количества эвтектики, поэтому она закономерно растет с увеличением в сплавах кальция (табл. 3). Добавка титана заметно измельчает структуру эвтектики [(Al)+ Al_4Ca].

Поскольку первичные кристаллы в структуре сплавов нежелательны, были выбраны доэвтектический Al-4Ca-0,2Ti и почти эвтектический Al-7Ca-0,2Ti сплавы. Их микроструктура в литом состоянии показана на рис. 3. В обоих сплавах присутствует небольшое количество хлопьевидных кристаллов фазы $\text{CaTi}_2\text{Al}_{20}$, дендриты (Al) и тонкодисперсная эвтектика [(Al)+Al₄Ca]. Для исследования сплавов в равновесном состоянии их получали при медленном охлаждении вместе с печью (рис. 3).

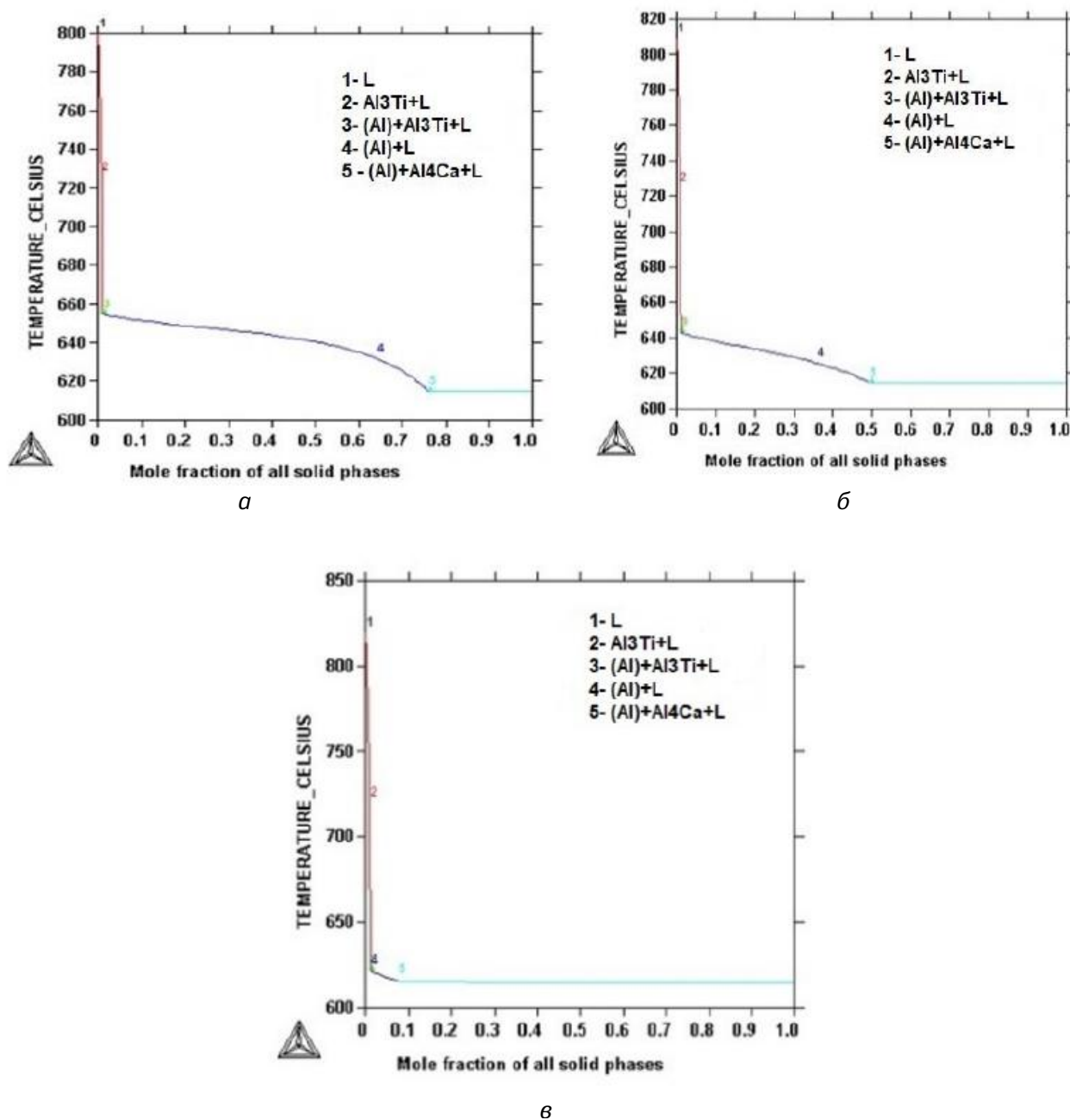


Рис. 1. Кривые неравновесной кристаллизации (Scheil-Gulliver):

а — для сплава Al-2Ca-0,5Ti; б — для сплава Al-4Ca-0,5Ti; в — для сплава Al-7Ca-0,5Ti

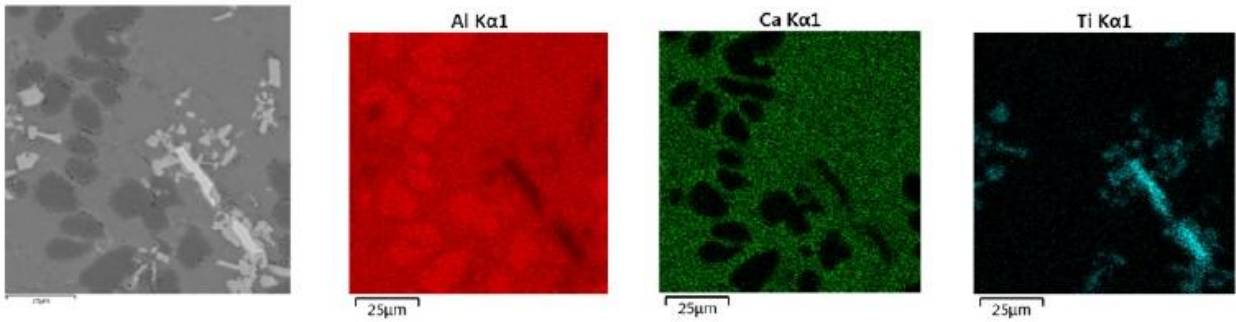


Рис. 2. Микроструктура сплава Al–7Ca–1Ti: а — литая структура; б — карты распределения компонентов

Таблица 2 – РФА сплава Al-10Ca-4Ti

стр.тип	Об. доль, %	Фаза	Вес. доль, %	Периоды, анг.
сF4/1	63.3 ± 0.1	Al (type Al)	65.7 ± 0.1	A=4.049
ti10/1	29.9 ± 0.1	CaAlH (type D1.3)	26.2 ± 0.1	A=4.370 C=11.229
сF184/1	4.6 ± 0.1	CaTi2Al20	4.9 ± 0.1	A=14.731
ti1/1	2.3 ± 0.0	(Ti20)Al3 (type D0.22)	3.1 ± 0.1	A=3.531 C=8.604

Таблица 3 – Твердость и электропроводность сплавов

Сплав	Твердость (HV)	УЭП
Al-2Ca-0.5Ti	35,0±1,0	22,3±1,0
Al-2Ca-1,0Ti	37,0±2,5	25,2±1,0
Al-2Ca-1,5Ti	41,0±3,0	26,6±0,5
Al-4Ca-0.5Ti	57,5±1,5	22,3±1,0
Al-4Ca-1,0Ti	63,4±3,0	24,6±0,5
Al-4Ca-1,5Ti	64,5±3,0	24,3±0,5
Al-7Ca-0.5Ti	75,6±2,0	19,5±1,0
Al-7Ca-1,0Ti	79,5±1,5	20,2±1,0
Al-7Ca-1,5Ti	80,3±1,0	19,7±1,0

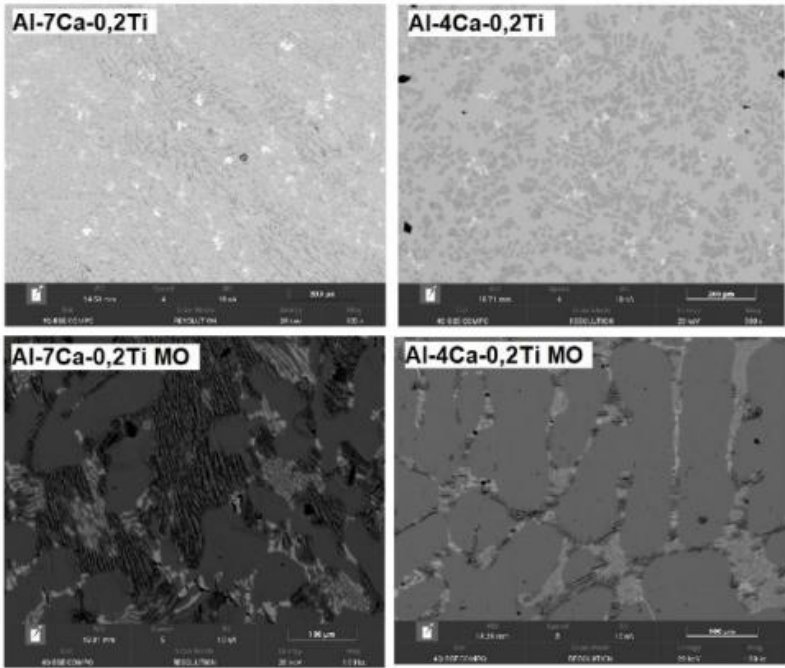


Рис. 3. Микроструктура литых в графитовую форму (сверху) и медленно охлажденных с печью (МО) образцов

Кристаллы тройного соединения в медленно охлажденных сплавах отсутствуют. Сплавы прокатали при температуре 500 °С от толщины образца 15 до 2 мм за 13 проходов с обжатиями 10–12 % за проход. Скорость прокатки составляла 0,12 м/с. Общая степень деформации обоих сплавов составила более 85 %. Для этих сплавов достаточной температурой горячей деформации может быть 400 °С, поскольку в процессе прокатки при 500 °С происходило налипание образцов на валки прокатного стана. При испытаниях на растяжение листов из сплавов Al–4Ca–0,2Ti и Al–7Ca–0,2Ti получены следующие механические свойства: предел прочности 134 и 193 МПа соответственно, относительное удлинение 24 и 22 % соответственно.

Заключение. С помощью расчетных и экспериментальных методов (Thermo-Calc) исследованы сплавы системы Al–Ca–Ti. Помимо дендритов (Al) и высокотонкой эвтектики, в сплавах содержатся светлые кристаллы грубой морфологии и серые кристаллы хлопьевидной компактной формы. Методом РФА было установлено, что тройное соединение имеет формулу $\text{CaTi}_2\text{Al}_{20}$ структурного типа cF184/1 с периодом решетки $A = 1,4731$ нм. Все сплавы, содержащие 0,5 % Ti можно отнести к перспективным «естественным композициям» с мелкими хлопьевидными первичными кристаллами на фоне высокодисперсной эвтектики. При испытаниях на растяжение листов из сплавов Al–4Ca–0,2Ti и Al–7Ca–0,2Ti получены следующие механические свойства: предел прочности 134 и 193 МПа соответственно, относительное удлинение 24 и 22 % соответственно. Высокая пластичность проката, имеющего в структуре 15–30 об. % эвтектических интерметаллидов, предполагает возможность изготовления проволоки для пайки, сварки, а также получения деталей методами аддитивных технологий.

Исследования проведены за счет гранта РНФ № 25-19-00002.

Список источников

- [1] Белов Н.А., Наумова Е.А., Акопян Т.К. *Эвтектические сплавы на основе алюминия: новые системы легирования*. Москва, Руда и Металлы, 2016, 256 с.
- [2] Наумова Е.А., Белов Н.А., Никитин Б.К., Громов А.В. Исследование технологических свойств литейных эвтектических сплавов на основе системы Al–Ca–Mn. *Материаловедение*, 2017, № 6, с. 9–13.
- [3] Альтман М.Б., Стромская Н.П. *Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов*. Москва, Металлургия, 1984, 128 с.
- [4] Mondolfo L.F. *Aluminum alloys: structure and properties*. London/Boston, Butterworths, 1976.