

УДК 669.715

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ AL-CA, AL-CE И AL-LA

Павел Сергеевич Бешенков⁽¹⁾, Мария Анатольевна Васина⁽²⁾

Студент 2 курса⁽¹⁾, аспирант 1 года⁽²⁾

кафедра «Материаловедение»

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель: Е.А. Наумова,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение»

Наиболее широко применяемыми литейными алюминиевыми сплавами являются силумины. Основное их достоинство – высокие технологические характеристики из-за наличия в них большого количества эвтектики (Al)+Si ((Al) – алюминиевый твердый раствор). Однако по прочности они уже не удовлетворяют требованиям быстро развивающейся техники. Поэтому стоит рассмотреть другие эвтектические системы на основе алюминия с целью создания на их основе перспективных композиций с оптимальным комплексом прочностных и технологических свойств.

В 90-е годы 20-го столетия был создан ряд высокопрочных и жаропрочных сплавов на основе системы Al-Ni [1]. Эвтектика (Al)+Al₃Ni в этой системе образуется при 6%Ni и 640°C [6], она значительно более дисперсная, чем алюминиево-кремниевая и в процессе отжига фаза Al₃Ni довольно быстро приобретает форму округлых частиц, равномерно распределенных в алюминиевой матрице. Эти сплавы прочны, технологичны при литье и пластичны. Из них можно также получать деформированные полуфабрикаты [2,3].

Авторы работ [4] разработали несколько перспективных жаропрочных композиций на основе системы Al-Ce-Ni с тройной эвтектикой (Al)+Al₄Ce+Al₃Ni. Такая структура более дисперсная, чем двойные эвтектики. По совокупности низко- и высокотемпературных механических свойств, а также литейных характеристик эти сплавы превосходят известные жаропрочные литейные сплавы AM5 (AL19), AK12MMgH (AL30) и AЦp1У. Но никель и церий являются дорогостоящими легирующими компонентами. Поэтому эти сплавы не могут быть применены для массового производства.

С целью снижения стоимости сплавов, мы считаем целесообразным рассмотреть композиции на основе других систем, например, Al-Ca-Ce. Кальций занимает третье место среди металлов по содержанию в земной коре (после алюминия и железа) [5]. Кроме того, кальций образует с алюминием диаграмму эвтектического типа при содержании кальция в эвтектике 7.6% [6]. По дисперсности структура эвтектики (Al)+Al₄Ca не уступает алюминиево-никелевой, поэтому мы ожидаем получить в новых сплавах сочетание прочности и технологичности. Возможно, для снижения стоимости сплава, стоит применять не чистый церий, а мишметалл, в состав которого входит и лантан. Поэтому целесообразно также исследовать систему Al-Ca-La.

Целью данной работы являлось исследование структуры и свойств сплавов двойных систем Al-Ca, Al-Ce и Al-La в литом и термически обработанном состоянии для сравнения по дисперсности и склонности к формоизменению входящих в их состав интерметаллидов.

Экспериментальные методики

Составы экспериментальных сплавов представлены в таблице 1. Плавку осуществляли в электрической печи "Graficarbo" в графитовом тигле. Сплавы были приготовлены на основе алюминия А99. Кальций вводили в виде лигатуры Al-18%Ca, кремний, церий и лантан в чистом виде. Легирующие компоненты вводили при температуре алюминиевого расплава около 780 °С. После полного растворения шихтовых материалов давали выдержку в течение 5-10 мин при 740 °С для выравнивания состава сплава. Затем при температуре 720-740 °С снимали шлак. После чего производили разливку металла в графитовую форму при температуре 710-720 °С, получая плоские отливки с размерами 10x15x180 мм.

Термообработку отливок проводили в муфельных электрических печах SNOL 8,2/1100 с точностью поддержания температуры около 5 К. Режим отжига - 500°C, 3 часа.

Твердость по Бринеллю определяли в соответствии с ГОСТ 9012-59 на твердомере DuraVision-20/200/250 при следующих параметрах: шарик- 2,5 мм, нагрузка- 612,9 Н, время выдержки -30 с.

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 механическую полировку с последующим травлением в реактиве Келлера.

Таблица 1. Химический состав экспериментальных сплавов

№	Система	Концентрация, масс. %					
		Ca	Ce	La	Si	Ni	Al
1	Al-Ca	4,0	-	-	-	-	основа
2		7,0	-	-	-	-	основа
3		7,6	-	-	-	-	основа
4		18,0	-	-	-	-	основа
5	Al-Ce	-	7,5	-	-	-	основа
6		-	12,0	-	-	-	основа
7	Al-La	-	-	12,0	-	-	основа
8		-	-	10,0	-	-	основа
9	Al-Si	-	-	-	11,0	-	основа
10	Al-Ni	-	-	-	-	6,0	основа

Результаты и их обсуждение

Были исследованы четыре сплава системы Al-Ca – два доэвтектических, эвтектический и заэвтектический (Таблица 1), их структуры представлены на рисунке 1. Расчет в программе Thermo-Calc и металлографические исследования согласуются с данными [6] в том, что в системе Al-Ca, эвтектика $L \rightarrow (Al) + Al_4Ca$ кристаллизуется при 7,6% Ca и 617 °С. Объемная доля эвтектики (Al)+Al₄Ca в сплаве Al-7,6%Ca составляет ~33 об.%, то есть, почти в три раза больше, чем в эвтектических силуминах. Структура сплавов 1 и 2 состоит из дендритов алюминиевого твердого раствора (Al) и дисперсной эвтектики (Al)+Al₄Ca (Рис.1а), колонии эвтектики в сплаве 3, имеющие четкие границы, вытянуты в направлении отвода тепла – от периферии к центру слитка. Первичные кристаллы отсутствуют. (Рис.1б). Первичные кристаллы фазы Al₄Ca имеют округлую форму и по данным [6] тетрагональную ОЦК решетку (10 атомов в элементарной ячейке).

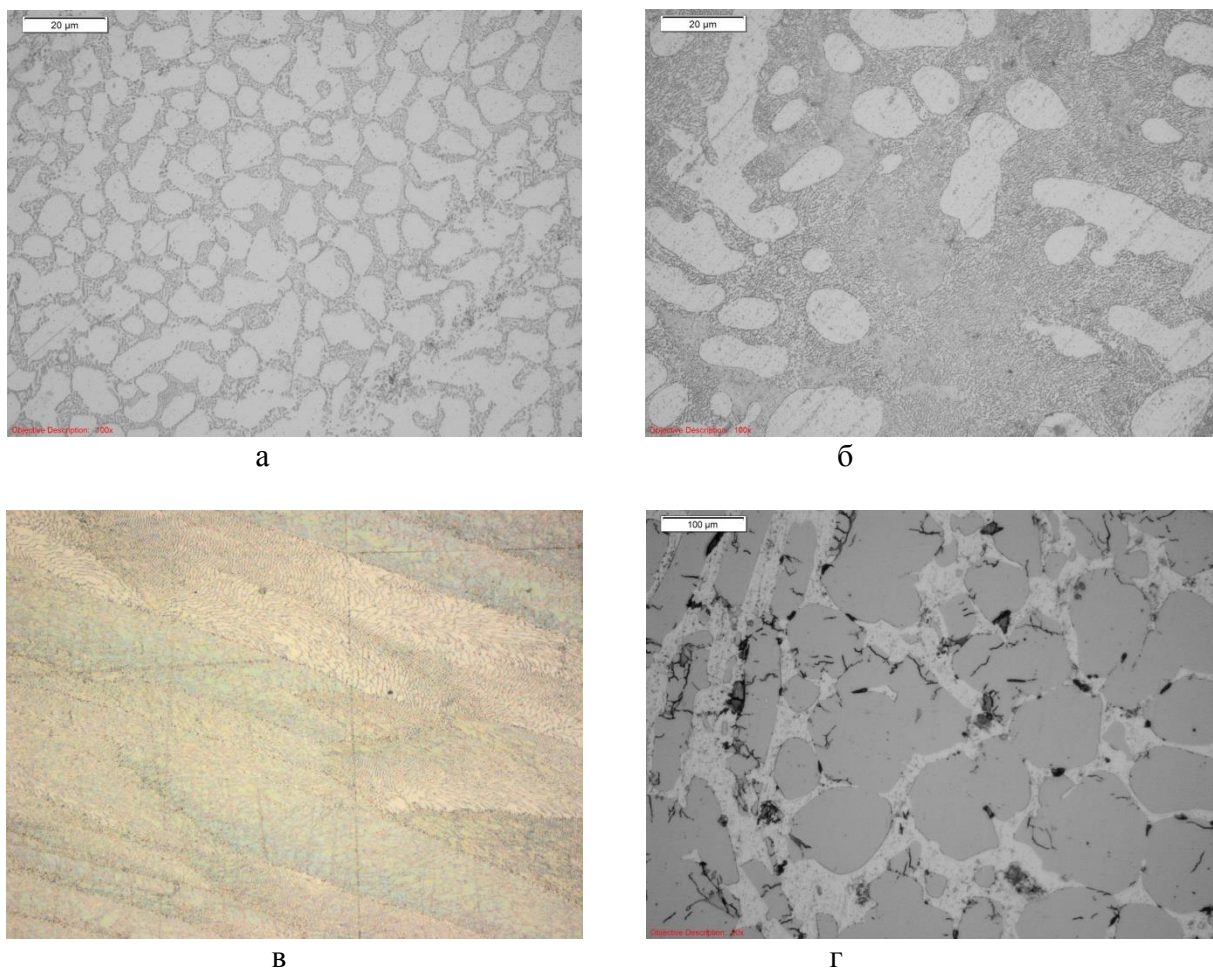


Рис. 1. Микроструктура сплавов в литом состоянии, ОМ: (а) Al-4%Ca, (б) Al-7%Ca, (в) Al-7/6%Ca, (г) Al-18%Ca, x1000

Алюминиево-цериевая эвтектика настолько же дисперсная, как и алюминиево-кальциевая (Рис. 2). В структуре сплава с 12%Ce наблюдается очень небольшое количество первичных кристаллов фазы Al_4Ce . Возможно, эвтектическая концентрация несколько ниже, чем указано в [6].

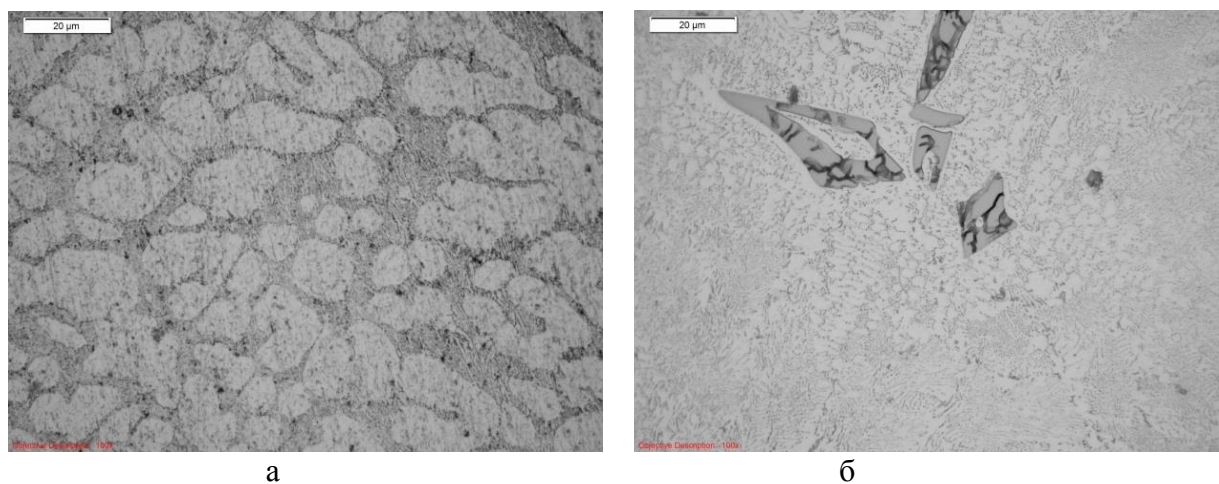


Рис. 2. Микроструктура сплавов в литом состоянии, ОМ: (а) Al-7,5%Ce, (б) Al-12%Ce, x1000

Эвтектическая структура сплавов системы Al-La несколько грубее, чем у сплавов с церием. В сплаве Al-12%La присутствует весьма значительное количество первичных кристаллов (Рис.3а), это не согласуется с данными [6].

Эвтектический сплав, полученный в данной работе, содержит 10%La (Рис.3).

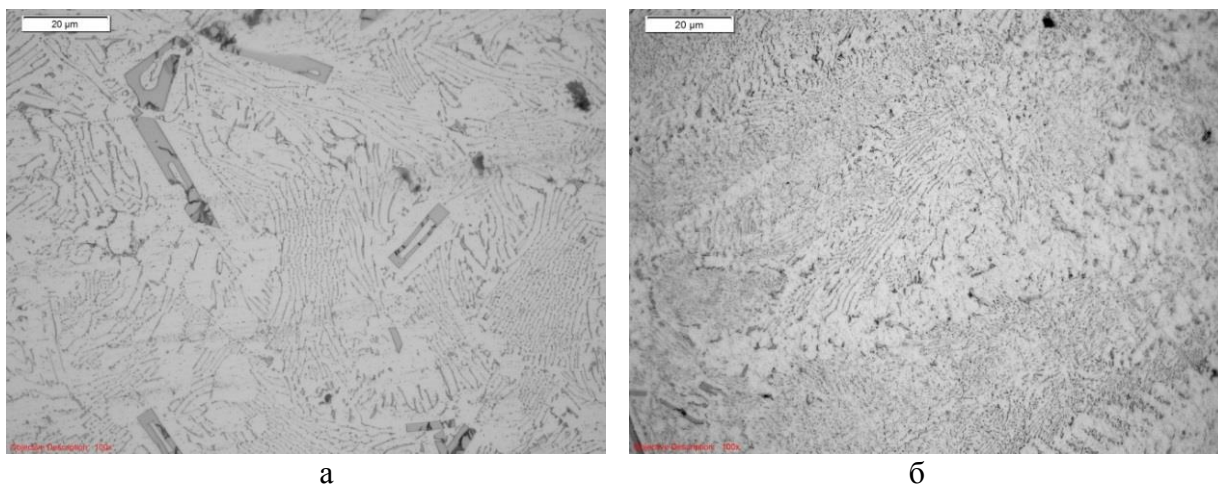


Рис. 3. Микроструктура сплавов в литом состоянии, ОМ: (а) Al-12%La, (б) Al-10%La, x1000

Сплавы систем Al-Si и Al-Ni были приготовлены для сравнительной оценки дисперсности эвтектических структур. Из представленных на рисунке 4 фотографий видно, что практически все исследованные эвтектики имеют такую же тонкую структуру, как алюминиево-никелевая, являющаяся основой высокопрочных и жаропрочных сплавов и заметно отличаются от грубой эвтектики (Al)+Si.

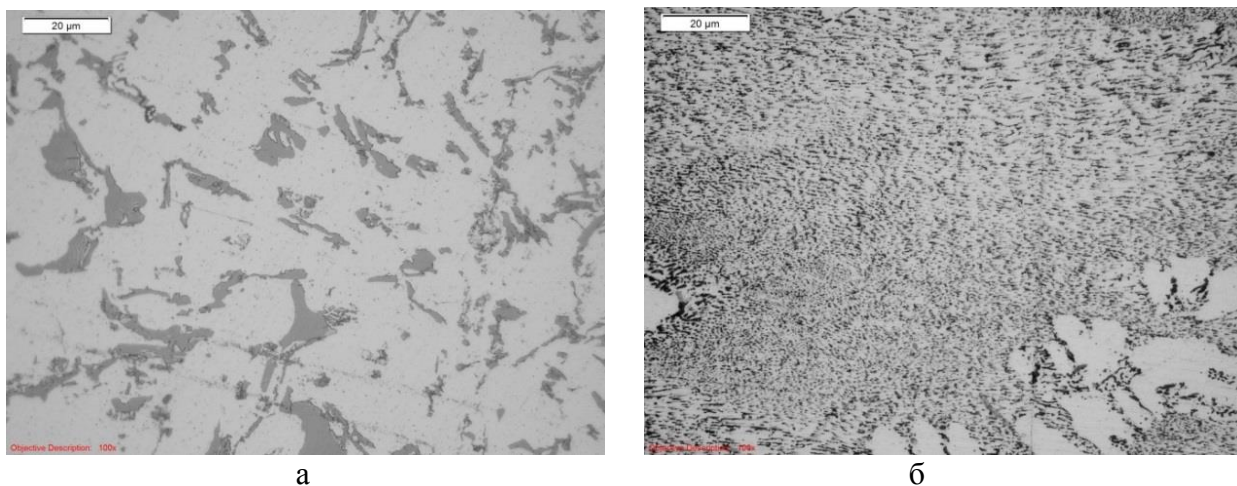


Рис. 4. Микроструктура сплавов в литом состоянии, ОМ: (а) Al-11%Si, (б) Al-6%Ni, x1000

Более детальное исследование строения эвтектик (Al)+Al₃Ni и (Al)+Al₄Ca одинакового уровня дисперсности демонстрирует существенные различия их формы. Фаза Al₃Ni, похоже, имеет стержневую форму, а эвтектика (Al)+Al₄Ca напоминает по строению ледебурит в чугунах. Здесь фаза Al₄Ca образует каркас, сквозь который «прорастают» дендриты (Al) (Рис.5).

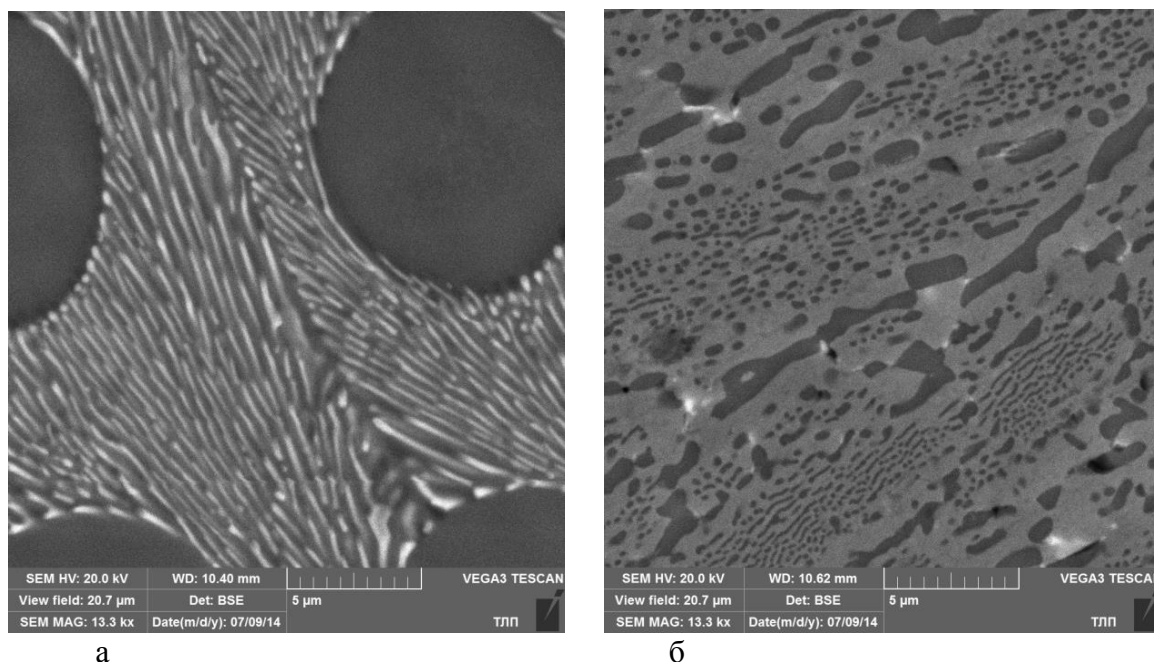
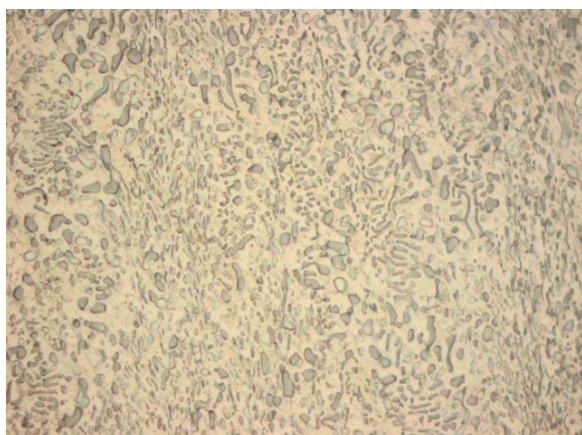


Рис. 5. Микроструктура сплавов в литом состоянии, СЭМ: (а) Al-6%Ni, (б) Al-7,6%Ca, $\times 13000$

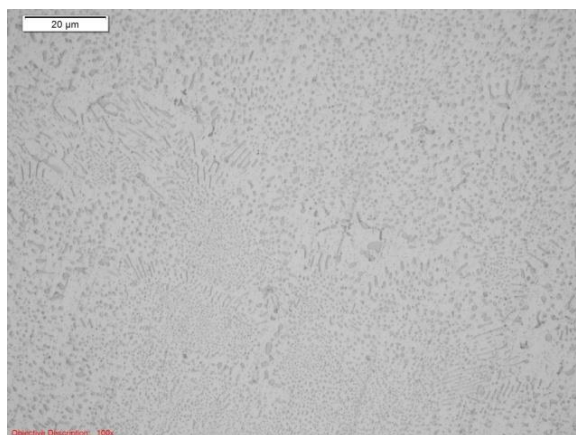
Исследовали влияние термической обработки (отжига) на формоизменение эвтектических фаз экспериментальных сплавов. В эвтектическом сплаве Al-7,6%Ca фрагментация и округление фазы Al_4Ca проходит при температуре отжига $500^{\circ}C$, а при температуре $600^{\circ}C$ частицы уже заметно огрубляются (Рис.6а). Твердость при этом закономерно снижается (Табл.2). В сплавах Al-12%Ce и Al-10%La после отжига при $500^{\circ}C$ практически не заметны изменения в структуре, и фрагментация проходит только при температуре отжига $600^{\circ}C$ (Рис.6 б,в).

Таблица 2. Значения твердости сплавов в различных состояниях

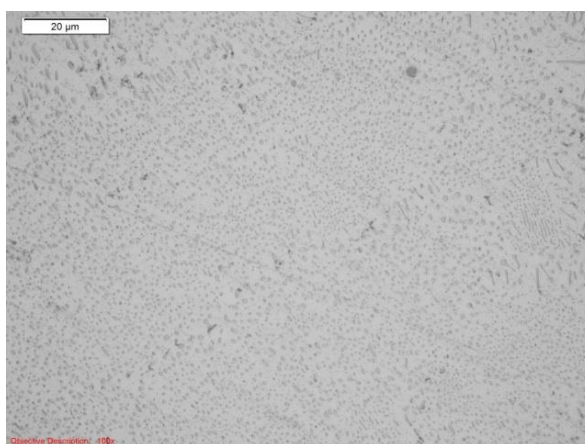
Материал	Литое состояние	После отжига $500^{\circ}C$	После отжига $600^{\circ}C$
Al-7,6%Ca	95,2 НВ	79,7 НВ	60,1 НВ
Al-12%Ce	59,6 НВ	52,1 НВ	46,3 НВ
Al-10%La	59,9 НВ	49,2 НВ	41,3 НВ



а



б



в

Рис. 6. Микроструктура сплавов после отжига при 600°C состоянии, ОМ: (а) Al-7,6%Ca, (б) Al-12%Ce, (в) Al-10%La, x1000

Выводы

1. Методом металлографического анализа исследовали структуры двойных сплавов систем Al-Ca, Al-Ce, Al-La. Установлено, что эвтектическая концентрация кальция в системе Al-Ca составляет 7,6%, что соответствует данным, указанным в литературе. В системе Al-La первичные кристаллы Al_4La появляются уже при концентрациях лантана выше 10%, а в сплаве Al-12%Ce есть небольшое количество первичных кристаллов Al_4Ce . Значит, эвтектическая концентрация церия немного ниже 12%.

2. Установлено, что эвтектика (Al)+ Al_4La заметно грубее и алюминиево-кальциевой, и алюминиево-цериевой эвтектик. А исследование морфологических особенностей эвтектик (Al)+ Al_3Ni и (Al)+ Al_4Ca наглядно продемонстрировало, что эвтектическая фаза Al_3Ni имеет стержневую форму, а у фазы Al_4Ca более округлые очертания.

3. Исследование влияния режимов термической обработки на формоизменение эвтектических фаз показало, что фрагментация фазы Al_4Ca проходит при 500°C, а более высокотемпературные эвтектики (Al)+ Al_4La и (Al)+ Al_4Ce фрагментируют только при 600°C. Твердость при этом закономерно снижается во всех исследованных сплавах.

Литература

1. Белов Н.А., Золоторевский В.С. «Литейные сплавы на основе алюминиево-никелевой эвтектики (никалины) как возможная альтернатива силуминам», Цветные металлы, 2003, №2, С.99-105.
2. Н.А. Белов. В.И.Титов, «Влияние кальция на структуру и упрочнение алюминиевых сплавов, легированных цинком и магнием», Цветные металлы, 2008, № 12 , С.64-67.
3. Н.А.Белов «Высокопрочный сплав на основе алюминия с добавкой кальция». Патент РФ № 2478132, публ. 27.03.2013, бюл.№9.
4. Belov, N.A., Naumova E.A., and Eskin, D.G. Casting alloys of the Al-Ce-Ni System: Microstructural Approach to Alloy Design // Mater. Sci. Eng. A, 1999, Vol.271, P.134-142.
5. Алюминий. Свойства и физическое металловедение: Справоч. изд. Энтони У.У., Элиот Ф.Р., Болл М.Д. / под ред. Дж.Е.Хэтча Пер.с англ. М., Metallurgia, 1989, 324 с.
6. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства сплавов/ Пер. с англ. – М.: Metallurgia, 1979. – 640 с.