

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-PЗМ

Шадрина Л.С., Бернгардт В.А., Дроздова Т.Н.  
научные руководители канд. техн. наук Лопатина Е.С.,  
канд. техн. наук Орелкина Т.А.  
*Сибирский федеральный университет*

Электротехническая отрасль промышленности испытывает потребность в материалах, совмещающих высокую электропроводность и достаточную прочность, сохраняющуюся после нагрева свыше 250 °С. В настоящее время для изготовления электротехнических изделий применяют алюминий марок А5Е, А7Е и низколегированные сплавы системы Al-Si-Mg, однако, из-за недостаточной прочности и термической стабильности область их применения существенно ограничена. Легирование алюминия редкоземельными металлами (РЗМ) существенно повышает прочность и жаропрочность, поэтому возможно применение сплавов системы Al-PЗМ для производства электропроводов.

Известно, что по растворимости в алюминиевом твердом растворе переходные металлы Се, La относятся к группе малорастворимых элементов, которые образуют с алюминием промежуточные фазы, обычно кристаллизующиеся в составе эвтектик. Эти фазы, как правило, тугоплавкие, а эвтектические температуры близки к температуре плавления алюминия, что положительно влияет на показатели жаропрочности. В случае высокой объемной доли промежуточных фаз и дисперсной структуры эвтектики механические свойства при комнатной температуре также повышаются.

Параметр решетки алюминия и электросопротивления мало меняются при увеличении концентрации церия, плотность увеличивается до 2,707 г/см<sup>3</sup> при 0,5 % Се. Повышение твердости и снижение значений относительного удлинения при введении церия незначительны. Добавки лантана на параметр решетки, электросопротивление, твердость, прочность и относительное удлинение алюминия существенно не влияют.

В лабораторных условиях ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» исследованы составы алюминиевых сплавов электротехнического назначения с различным содержанием церия, лантана. Для приготовления сплавов в качестве основных легирующих компонентов использовали сплавленные лигатуры Al-Мишметалл (ММ) производства фирмы КВМ.

В данной работе исследовали сплавы с различным содержанием РЗМ в литом и деформированном состоянии. Литьем в металлическую форму получают слитки. По технологии совмещенного литья и прокатки прессования (СЛИПП) получают прутки диаметром 9 мм. Волочение используют для получения проволоки диаметром 2 мм. Микроструктура слитков, прутков и проволоки приведена в таблице 1.

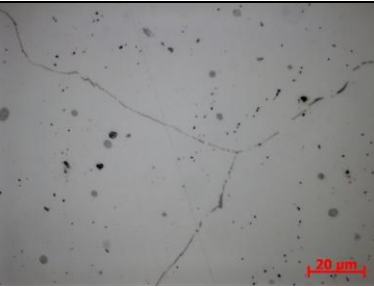





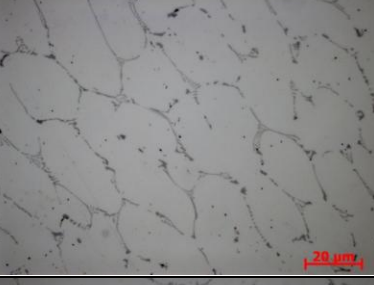


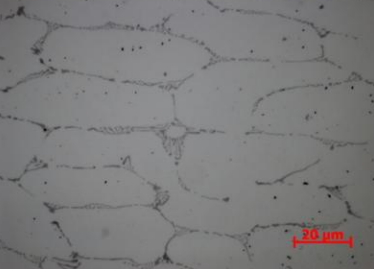


Фазовый состав слитков представляет собой зерна α-твердого раствора и эвтектические включения фаз, выделившиеся по границам дендритных ячеек при эвтектической кристаллизации расплава.

Незначительная растворимость Се, La в алюминии предполагает появление эвтектических фаз в структуре сплавов при незначительных концентрациях легирующих редкоземельных элементов (выше 0,05 масс. %), что объясняет присутствие отдельных включений эвтектических фаз в структуре даже малолегированных РЗМ сплавов.

Увеличение концентрации легирующих элементов влияет на размер дендритных ячеек, форму эвтектических кристаллов и объемную долю эвтектических составляющих в сплавах системы Al-PЗМ. При легировании сплавов РЗМ до 1,5%

размер дендритной ячейки уменьшается в 5-6 раз и составляет 30-40 мкм. В микроструктуре слитков по границам дендритных ячеек выделяется эвтектика пластинчатой формы, состоящая из фаз  $\alpha$  +  $Al_4Me$  ( $Al_{11}Me_3$ ). При исследовании микроструктуры сплавов Al-PЗМ, содержащих 2,5 и 4 масс. % PЗМ установлено, что повышение концентрации в анализируемом интервале приводит к уменьшению размера дендритной ячейки до 20 мкм и увеличению объемной доли эвтектики  $\alpha$  +  $Al_4Me$  ( $Al_{11}Me_3$ ). В высоколегированных сплавах 4 масс. % PЗМ в структуре пластинчатой эвтектики присутствуют крупные кристаллы фазы типа  $Al_4Me$  ( $Al_{11}Me_3$ ), в состав которых входит железо и/или кремний. Выделения эвтектических кристаллов оконтуривают дендритные ячейки.

Таблица 1 - Микроструктура полуфабрикатов из сплавов Al-PЗМ,  $\times 1000$

% PЗМ	Слиток	Пруток	Проволока
0,5			
1,5			
2,5			
4,0			

Технология получения прутков методом СЛИПП из исследуемых слитков привела к значительным изменениям микроструктуры. На образцах всех сплавов наблюдается неоднородность в виде полос структурных составляющих,

ориентированных в направлении оси деформации, состоящих из эвтектических колоний, имеющих пластинчатое строение.

По сечению прутка с концентрацией РЗМ 0,5 масс. % проявляется неоднородность, характеризующаяся зонами с повышенным количеством эвтектических составляющих, вытянутых в строчки, и зонами с единичными выделениями эвтектических кристаллов (таблица 1). Причем, области, обогащенные эвтектическими выделениями, формируются в центральной части прутка, периферийная часть практически не содержит фаз  $Al_4Me$  ( $Al_{11}Me_3$ ). Увеличение концентрации легирующих элементов усиливает и неоднородность в структуре прутков.

Волочение проволоки из исследованных прутков не устранило неоднородности исходных заготовок. Структура проволоки разных составов подобна структуре прутков тех же составов. В проволоке присутствует незначительная неоднородность в виде 1-2 строчек избыточных фаз вдоль направления деформации. Строчечность в структуре проволоки возрастает с повышением легированности сплавов РЗМ (1,5-4 %).

Механические и электрофизические свойства в зависимости от концентрации ММ в сплаве приведены в таблице 2.

С увеличением количества РЗМ в сплаве возрастают прочностные характеристики и падают пластические как прутков, так и проволоки.

В основном, на уровень микротвердости существенное влияние оказывает неоднородность структуры. Микротвердость и прочностные свойства проволоки существенно выше, чем прутков, что обусловлено высокой дисперсностью структурных составляющих и деформационным упрочнением, связанным с искажениями кристаллического строения.

Замеры электросопротивления на прутках показали, что значения этого параметра находятся в пределах 0,0282-0,0311 Ом·мм<sup>2</sup>/м, то есть чем выше содержание РЗМ, тем выше значения удельного электросопротивления. Это связано в основном с увеличением объемной доли эвтектики в сплавах при повышении концентрации легирующих элементов.

Таблица 2 – Механические и электрофизические свойства деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-РЗМ

% РЗМ	Механические свойства прутка диаметром 9 мм		Микротвердость прутков HV, кгс/мм <sup>2</sup>	Механические свойства проволоки диаметром 2 мм		Микротвердость проволоки HV, кгс/мм <sup>2</sup>	Удельное электрическое сопротивление проволоки, Ом·мм <sup>2</sup> /м
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %		$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %		
0,5	123	33	32,5±1,2	165	7,0	42,1±1,4	0,0282
1,5	124	32	31,0±1,3	186	6,0	53,0±0,9	0,0291
2,5	140	30	38,1±2,1	188	5,8	53,7±1,7	0,0297
4,0	158	23	32,9±0,9	199	5,6	52,3±3,4	0,0311

Таким образом, проведенные исследования показали, что разработанные низколегированные сплавы системы Al-РЗМ можно использовать для производства электрических проводников. При этом полуфабрикаты из них обладают высокими прочностными характеристиками, в 1,5-2 раза превышающими показатели временного сопротивления разрыву катанки из стандартных марок электротехнического алюминия.