

УДК 621.745.435

А.А. Скупов¹, Е.Н. Иода¹, М.Д. Пантелеев¹**НОВЫЕ ПРИСАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВАРКИ
ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-4-4

Разработаны составы присадочных материалов на основе системы Al–Cu с добавками Sc, Hf, Nd, Ag, обеспечивающими повышение стойкости к образованию горячих трещин и механических свойств сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов по сравнению с показателями, полученными для варианта сварки с использованием серийного присадочного материала Sv-1201. Показана перспективность использования этих присадочных материалов для изготовления сварных конструкций и повышения их эксплуатационной надежности и долговечности.

Ключевые слова: присадочные материалы, сварка, алюминий-литиевые сплавы, редкоземельные металлы, легирование алюминиевых сплавов.

Compositions of Al–Cu filler materials with additions of Sc, Hf, Nd, Ag to provide with improved resistance to hot cracking and mechanical properties of welding joints of high-strength aluminum-lithium alloys comparing with those obtained using the serial welding filler material SV-1201 are developed. It is shown that application of the developed filler materials is perspective for manufacturing welded structures and provides with increased operating reliability and durability.

Keywords: filler materials, welding, aluminum-lithium alloys, rare-earth metals, modification alloying of aluminum alloys.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.8. «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Повышение весовой эффективности изделий авиационной техники является актуальной задачей и может быть достигнуто путем разработки и применения новых перспективных материалов и технологии их неразъемного соединения, самой распространенной из которых является сварка. Во ФГУП «ВИАМ» в последние годы разработаны новые алюминий-литиевые сплавы третьего поколения, такие как высокопрочные свариваемые сплавы В-1461 (Al–Cu–Li), содержащий цинк, и В-1469 (Al–Cu–Li), содержащий серебро. К сплаву В-1461 предъявляются основные требования по высокому уровню ресурсных характеристик и сохранению высокой прочности и пластичности в широком интервале рабочих температур от -250 до +160°C. Он предназначен для применения в виде листов, плит и пресованных профилей для обшивки и внутреннего силового набора фюзеляжа современных самолетов различного назначения. Сплав В-1469 рекомендован для элементов, работающих на сжатие длительно во всех климатических условиях до температуры 150°C (верхние поверхности крыла, лонжероны, балки,

стрингеры и другие детали фюзеляжа). Применение данных сплавов в сварных конструкциях позволит снизить массу изделий на 10–15% по сравнению с клепаными [2–5]. Изготовление крупногабаритных сварных конструкций из высокопрочных алюминий-литиевых сплавов связано с большими сложностями вследствие их склонности к образованию горячих трещин, пористости, а также разупрочнению под воздействием термического цикла сварки плавлением ($\sigma_{в.св} \leq 0,6\sigma_{в}$) [3–8].

Повысить эксплуатационные характеристики сварных соединений этих сплавов возможно благодаря применению новых присадочных материалов. Известно, что эффективность действия модификатора по мере увеличения его концентрации исчерпывается при определенном его содержании в сплаве. Дальнейшее увеличение содержания модификатора сверх этого предела нецелесообразно из-за образования грубых выделений интерметаллидов, не участвующих в процессе измельчения зерна. Поэтому необходимо комплексное модифицирование одновременно несколькими модификаторами, образующими соединения, не способные к взаимному объединению и коагуляции [9].

Наиболее перспективным направлением легирования алюминиевых сплавов является введение компонентов из переходных групп – Mn, Zr, Ti, редких (PM) и редкоземельных металлов (РЗМ). Уменьшение склонности к образованию горячих трещин, повышение прочности и пластичности алюминиевого сплава связано с измельчением зерна, полным или частичным подавлением процессов рекристаллизации в сплаве, с непосредственным упрочняющим воздействием частиц дисперсоидов. Снижение склонности к трещинообразованию в этом случае достигается за счет понижения температуры перехода от жидко-твердого состояния к твердожидкому, т. е. понижения верхней границы температурного интервала хрупкости (ТИХ) и таким образом сужения диапазона его значений, а также снижения температуры начала линейной усадки и уменьшения напряжений в шве к моменту завершения кристаллизации. В последние годы Американской алюминиевой ассоциацией зарегистрирован ряд сплавов (марки 2039, 2094, 2095, 2195, 7009), легированных серебром. Серебро хорошо растворяется в алюминии (0,6–0,7% (по массе) при комнатной температуре), образуя два интерметаллидных соединения Ag_3Al и Ag_2Al , обеспечивающих значительный модифицирующий эффект и повышение прочностных характеристик алюминиевого сплава [10–17].

Модифицирующее действие различных легирующих металлов в конечном счете должно определяться их реакционной способностью, выражаемой критерием степени неоднородности d-электронных оболочек. В качестве такого критерия использована величина $1/Nn$ (где N – главное квантовое число d-оболочки; n – число электронов на d-оболочке), которая получила название акцепторной способности d-электронной оболочки атома переходного металла. Чем больше акцепторная способность атомов легирующего компонента, тем более активно он взаимодействует с Al и, следовательно, тем более сильным модификатором является. Самые эффективные модификаторы – Sc, Ti, Zr, Hf. Чем круче идет линия ликвидус на диаграмме состояния «алюминий–модифицирующий элемент», тем более эффективным модификатором он является [18].

В настоящее время в качестве присадочного материала для сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов в России используются сплавы системы Al–Cu марок Св-1201, Св-1207 и Св-1217, а за рубежом – сплав той же системы марки 2319. Однако они не обеспечивают получения оптимального сочетания характеристик прочности, пластичности и стойкости к образованию горячих трещин в сварном соединении. Таким образом, учитывая значительное влияние PM и РЗМ на свойства алюминиевых сплавов, целесообразно введение их в состав присадочных материалов для сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов системы Al–Cu–Li [19].

Материалы и методы

Исследования проводили на листовых полуфабрикатах высокопрочных алюминий-литиевых сплавов В-1461 (толщина 2,5 мм) и В-1469 (толщина 2,2 мм). Стойкость к образованию горячих трещин оценивалась по методике МГТУ им. Н.Э. Баумана на специальной установке ЛТП 1-6. Критерием количественной оценки технологической прочности металла по данной методике служит величина критической скорости деформации растяжения $V_{кр}$ металла шва в процессе кристаллизации, при которой в нем начинают возникать горячие трещины. Методы исследования и геометрические размеры образцов для определения механических характеристик (σ_b , α , КСЧ) сварных соединений соответствуют ГОСТ 6996–66. Испытания по определению малоцикловой усталости сварных соединений проводили согласно ГОСТ 25.502–79, исследования микроструктуры – с помощью сканирующего электронного микроскопа Verios 460, конфокального лазерного сканирующего микроскопа Olympus Lekst OLS3100. Фрактографический анализ изломов проводили с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490LV (фирмы Jeol).

Результаты

Для исследования влияния состава присадочного материала на механические свойства и склонность к образованию горячих трещин высокопрочных алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469, а также на основании анализа научных литературных данных выбраны экспериментальные композиции присадочных материалов для сварки, содержащие: Cu, Mn, Sc, Ti, Zr, Hf, Ce, Nd, Y, Dy, Ag.

Выбраны технологические параметры процессов плавки и литья экспериментальных составов присадочных материалов на основе системы Al–Cu, легированных РЗМ, обеспечивающие защиту расплава от окисления, дегазацию и снижение вероятности образования крупных интерметаллидных фаз. С использованием выбранных параметров технологических процессов плавки, литья и последующей пластической деформации изготовлены присадочные материалы 10 выбранных экспериментальных составов.

Горячие трещины являются недопустимым дефектом при сварке плавлением алюминиевых сплавов. Поэтому при исследовании свариваемости какого-либо материала в первую очередь оценивают его стойкость к образованию горячих трещин. Существует большое количество специальных проб для количественной оценки технологической прочности сплавов («рыбий скелет», крестовая проба, кольцевая проба и др.). В данной работе выбрана методика оценки трещиностойкости МГТУ им. Н.Э. Баумана, так как она предусматривает использование автоматической аргоно-дуговой сварки (ААрДЭС) на специальной установке ЛТП 1-6 вместо ручной.

Исследовано влияние составов экспериментальных присадочных материалов на стойкость к образованию горячих трещин высокопрочных алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469. Сварку проводили с использованием присадочных материалов экспериментальных составов (1–10) и серийной присадочной проволоки марки Св-1201 (табл. 1).

Из данных табл. 1 видно, что наибольшей стойкости к образованию горячих трещин при сварке высокопрочных алюминий-литиевых сплавов удалось достичь путем применения присадочных материалов, содержащих 6 и 10% Cu с добавлением РЗМ (Sc, Nd), Hf и Ag.

Таблица 1

**Результаты испытаний на стойкость к образованию горячих трещин
сплавов В-1461 и В-1469**

Маркировка присадки	Состав присадочных материалов	$V_{кр}$, мм/мин, сплавов	
		В-1461	В-1469
1	Al-4Cu-Mn-Sc-Ti-Zr-Hf-Nd-Ag	1,8	2,7
2	Al-6Cu-Mn-Sc-Ti-Zr-Hf-Nd-Ag	3,5	3,64
3	Al-6Cu-Sc-Ti-Zr-Dy-Ag	2,34	3,42
4	Al-6Cu-Mn-Ti-Zr-Hf-Ce-Ag	3,42	2,7
5	Al-6Cu-Mn-Sc-Hf-Ce-Y	2,1	3,1
6	Al-6Cu-Mn-Sc-Ce-Nd-Dy	2,55	2,7
7	Al-6Cu-Mn-Sc-Hf-Dy-Ag	2,7	2,89
8	Al-10Cu-Mn-Sc-Ti-Zr-Hf-Nd-Ag	3,64	3,9
9	Al-10Cu-Sc-Ce-Nd-Dy	2,34	2,89
10	Al-10Cu-Mn-Hf-Ce-Nd-Dy	2,1	2,55
Св-1201	Al-6Cu-Mn-Ti-Zr	2,34	2,55

Для дальнейших исследований влияния состава присадочного материала на механические свойства и структуру сварных соединений проведена ААрДЭС стыковых заготовок листовых полуфабрикатов сплавов В-1461 и В-1469. Для сварки использовали экспериментальные присадочные материалы, легированные РЗМ, благодаря которым удалось достичь максимальных значений $V_{кр}$, и серийная сварочная проволока марки Св-1201.

Проведены испытания сварных соединений листовых заготовок сплавов В-1461 и В-1469 (табл. 2). Анализ механических свойств показал, что максимальная прочность и минимальное разупрочнение при удовлетворительных показателях ударной вязкости и пластичности сварных соединений обоих сплавов достигается при использовании экспериментальной присадочной проволоки, содержащей 10% Cu с добавками Sc, Hf и Nd.

Таблица 2

Механические свойства сварных соединений сплавов В-1461 и В-1469

Сплав	Присадка	$\sigma_{в.св}$, МПа	$K = \sigma_{в.св} / \sigma_{в}$	$\sigma_{в.шва}$, МПа	KCU , кДж/м ²		α , град
					$KCU_{цш}^*$	$KCU_{з.с}^{**}$	
В-1461	Al-6Cu-Sc-Hf-Nd	380	0,72	295	155	95	45
	Al-10Cu-Sc-Hf-Nd	395	0,75	295	160	100	40
	Св-1201	360	0,68	290	120	85	40
В-1469	Al-6Cu-Sc-Hf-Nd	405	0,74	310	165	130	65
	Al-10Cu-Sc-Hf-Nd	410	0,75	325	175	150	55
	Св-1201	370	0,67	305	160	125	60

* Центр шва.

** Зона сплавления.

Металлографические исследования показали, что в сварных соединениях отсутствуют дефекты типа пор, оксидных включений и трещин, характерные для сварки плавлением высокопрочных алюминий-литиевых сплавов. Максимальный размер зерна характерен для швов, выполненных серийной присадкой Св-1201, в которой содержится 6% Cu, Ti и Zr. Величина зерна в швах, выполненных с этой присадкой, составляет 50–90 мкм (рис. 1, а). Введение в состав присадочных материалов РЗМ (Sc, Nd) и Hf приводит к измельчению дендритной структуры шва (рис. 1, б), размер зерна в этом случае составляет от 5 до 25 мкм.

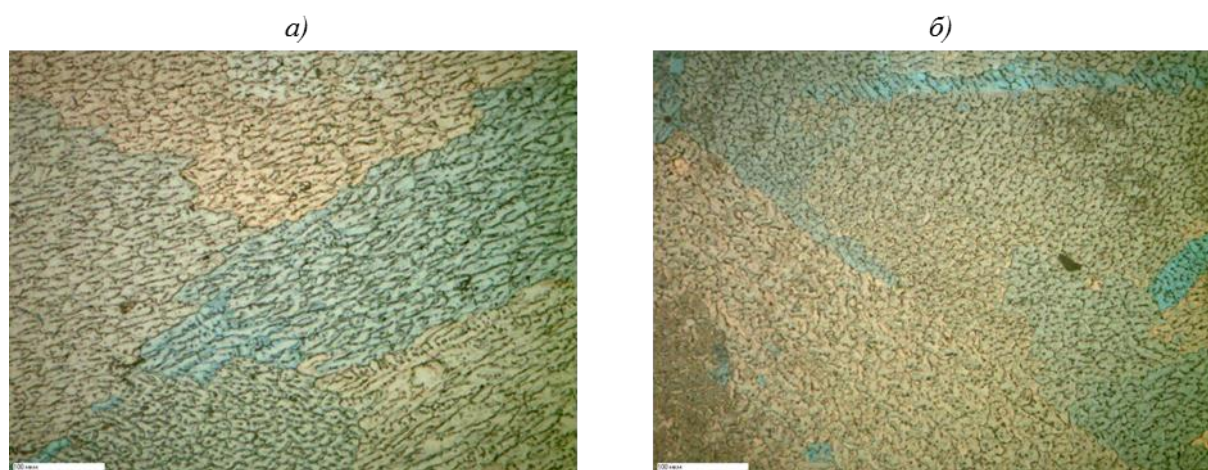


Рис. 1. Микроструктура шва сварного соединения сплава В-1469, выполненного ААрдЭС: а – центр шва с присадкой Св-1201; б – центр шва с присадкой, легированной РЗМ

Анализ результатов испытаний на малоцикловую усталость (МЦУ) показал, что применение присадочных проволок экспериментальных составов позволило повысить значения МЦУ сварных соединений по сравнению со сварочной проволокой Св-1201 (табл. 3). Для исследования характера разрушения образцов при испытании на МЦУ проведен фрактографический анализ, который показал, что изломы сварных образцов, полученных с присадками, легированными РЗМ, характеризуются большей локальной пластичностью, отсутствием сварочных дефектов и формированием ямочного рельефа с наличием мелких интерметаллидных фаз, содержащих частицы РМ и РЗМ (рис. 2).

Таблица 3

Малоцикловая усталость сварных соединений сплавов В-1461 и В-1469

Сплав	Присадка	Напряжение $\sigma_{\max}^{\text{нетто}}$, МПа	МЦУ: число циклов до разрушения
В-1461	Al-6Cu-Sc-Hf-Nd	157	>300000
		196	108420
	Al-10Cu-Sc-Hf-Nd	157	>300000
		196	177680
Св-1201	157	>300000	
	196	78700	
В-1469	Al-6Cu-Sc-Hf-Nd	157	260950
		196	133080
	Al-10Cu-Sc-Hf-Nd	157	>300000
		196	98100
	Св-1201	157	110030
		196	60300

Методом растровой электронной микроскопии проведено исследование влияния химического состава присадочного материала на распределение упрочняющих фаз в шве и зоне сплавления сварных соединений сплавов В-1461 и В-1469, выполненных ААрдЭС с использованием экспериментальных присадочных материалов, легированных РЗМ. Установлено, что интерметаллидные фазы, содержащие Nd, Hf, Ti и Sc, распределяются в основном в материале шва, при этом в зоне сплавления присутствие этих частиц не зафиксировано (рис. 3).

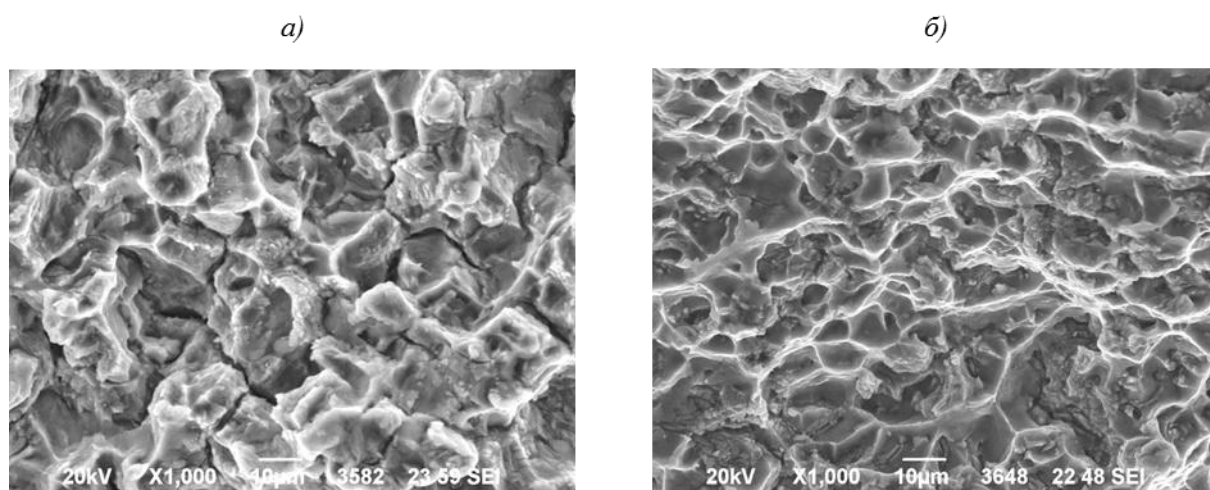


Рис. 2. Структура излома сварных соединений, выполненных с присадочным материалом, легированным РЗМ, сплавов В-1461 (а) и В-1469 (б)

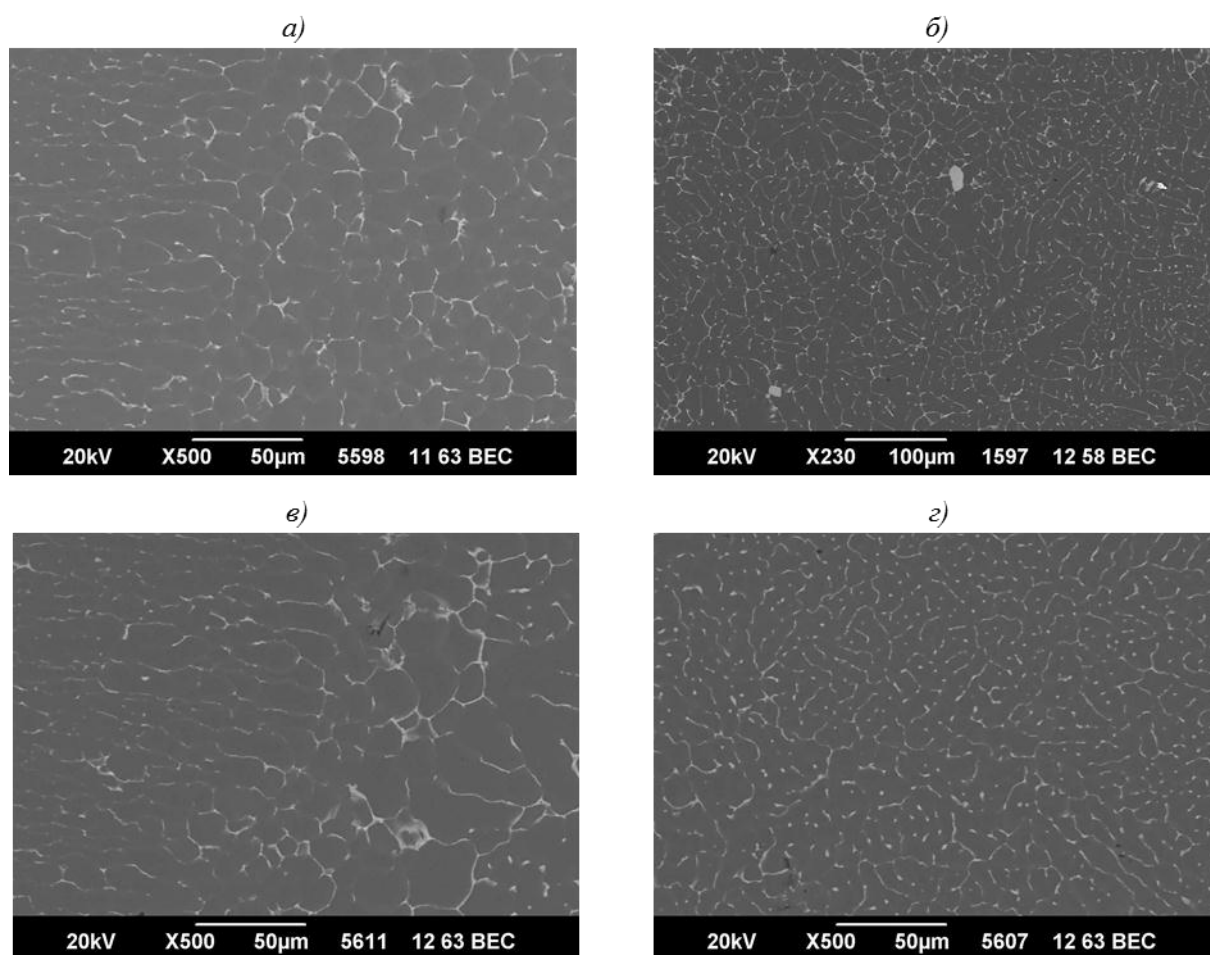


Рис. 3. Микроструктуры зоны сплавления (а, в) и центра шва (б, г) сплавов В-1461 (а, б) и В-1469 (в, г)

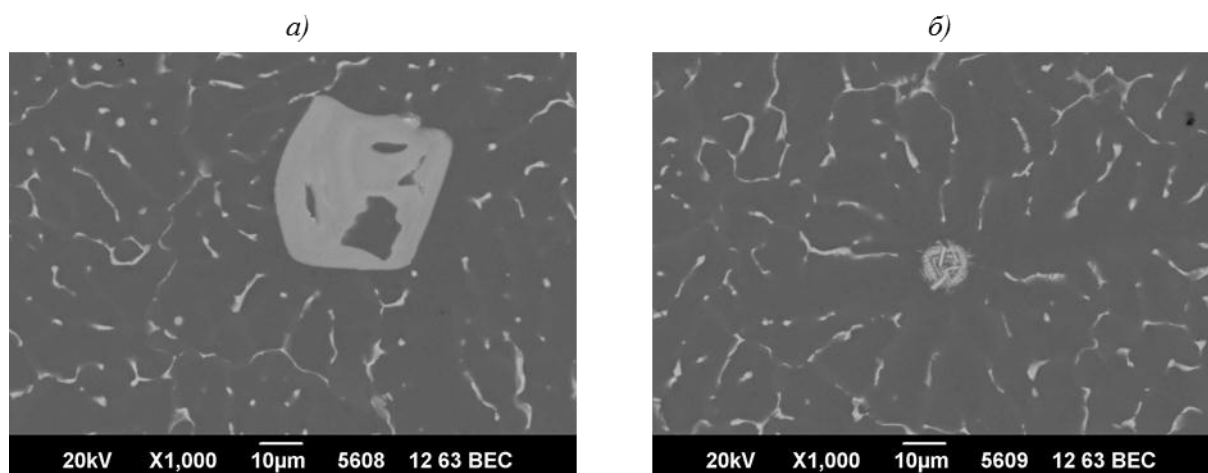


Рис. 4. Микроструктуры частиц, содержащих Nd (а) и Hf, Ti и Sc (б)

Установлены размеры и форма частиц, содержащих РЗМ:

- интерметаллиды, содержащие Nd, – частицы неправильной или прямоугольной формы размером ~10 мкм, также встречаются одиночные частицы размером ~30 мкм;
- интерметаллиды, содержащие Hf, Ti и Sc, – частицы округлой формы размером 5–20 мкм (рис. 4).

Обсуждение и заключение

Таким образом, показано, что легирование присадочных материалов РМ и РЗМ (Sc, Nd, Hf) обеспечивает измельчение дендритной структуры и уменьшение размера зерна, что позволяет повысить значение стойкости к образованию горячих трещин, а также механические свойства (особенно МЦУ) сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469 по сравнению с показателями, полученными при применении серийной присадочной проволоки Св-1201.

Полученные результаты показывают перспективность использования присадочных материалов, легированных РМ и РЗМ, для изготовления сварных конструкций, выполненных сваркой плавлением (аргоно-дуговой, лазерной, гибридной).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Перспективные алюминиевые сплавы и технологии их соединения для изделий авиакосмической техники // Тез. докл. 2-ой Междунар. конф. «Алюминий-21. Сварка и пайка». 2012. Ст. 8.
3. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Жегина И.П., Иода Е.Н., Лоскутов В.М. Особенности и перспективы сварки алюминийлитиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2002. №4. С. 3–12.
4. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
5. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
6. Лукин В.И., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А. Влияние термической обработки на характеристики сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата

- обращения: 12.11.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-6-6.
7. Лукин В.И., Оспенникова О.Г., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. Сварка алюминиевых сплавов в авиакосмической промышленности // Сварка и диагностика. 2013. №2. С. 47–52.
 8. Лукин В.И., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А., Овчинников В.В. Сварка трением с перемешиванием высокопрочных алюминий-литиевых сплавов В-1461, В-1469 // Сварочное производство. 2015. №7. С. 21–25.
 9. Никифоров Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. М.: Машиностроение, 1972. 164 с.
 10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.02.2015).
 11. Лукин В.И., Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Горелова Л.П. Зависимость свариваемости сплавов системы Al–Mg (серии 5XXX) от соотношения легирующих элементов (Sc, Zr и Mn) // Сварка и Диагностика. 2015. №4. С. 9–12.
 12. Лукин В.И., Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Иода Е.Н. Влияние добавок скандия на свариваемость алюминиевых сплавов системы Al–Mg // Сварка и диагностика. 2016. №1. С. 13–15.
 13. Krupinski M., Labisz K., Dobranski L.A., Rdzawski Z. Derivative thermo analysis of the Al–Si cast alloy with addition of rare earths metals // Archives of Foundry Engineering. 2010. Vol. 10. P. 79–82.
 14. Wang Wen-tao, Zhang Xin-ming, Gao Zhi-guo, Jia Yu-zhen, Ye Ling-ying, Zheng Da-wei, Liu Ling. Influences of Ce addition on the microstructures and mechanical properties of 2519A aluminum alloy plate // Journal of Alloys and Compounds. 2010. No. 1–2. P. 366–371.
 15. Иванова А.О., Вахромов Р.О., Григорьев М.В., Сенаторова О.Г. Исследование влияния малых добавок серебра на структуру и свойства ресурсных сплавов системы Al–Cu–Mg // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №10. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-1-1.
 16. Mukhopadhyay A.K. and Reddy G.M. Influence of trace addition of Ag on the weldability of Al–Zn–Mg–Cu–Zr base 7010 alloy // Materials Science Forum. 2002. Vol. 396–402. P. 1665–1670.
 17. Рябов Д.К., Вахромов Р.О., Иванова А.О. Влияние малых добавок элементов с высокой растворимостью в алюминии на микроструктуру слитков и холоднокатаных листов из сплава системы Al–Mg–Sc // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №9. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-5-5.
 18. Елагин В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. М.: Metallurgy, 1975. 248 с.
 19. Дриц А.М., Овчинников В.В. Результаты исследований свариваемости высокопрочных сплавов системы Al–Cu–Li–Mg, легированных серебром, скандием и цирконием // Технология легких сплавов. 2011. №1. С. 29–38.