

УДК 669.046.516

А.А. Скупов¹, М.Д. Пантелеев¹, Е.Н. Иода¹, Д.А. Мовенко¹**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ
ДЛЯ ЛЕГИРОВАНИЯ ПРИСАДОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-14-19

Легирование редкоземельными металлами (РЗМ) алюминиевых сплавов является в настоящее время перспективным направлением. Существующие присадочные материалы не обеспечивают получения оптимального сочетания характеристик прочности, пластичности и стойкости к образованию горячих трещин сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов. Показан характер влияния системы легирования присадочного материала на значения трещиностойкости высокопрочных алюминий-литиевых сплавов, выявлен характер распределения редкоземельных и переходных металлов в сварном шве. Применение присадочного материала, легированного РЗМ, повышает механические свойства сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов по сравнению с показателями, полученными для варианта сварки с использованием серийного присадочного материала.

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].

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

Today, the usage of rare earth metals for alloying of aluminum alloys is perspective way. The existing filler materials don't provide optimal combination of strength, ductility and resistance to the formation of hot cracks of joint welds of high-strength aluminum-lithium alloys. In this article, the influence of filler materials alloying system on crack resistance of high-strength aluminum-lithium alloys was shown and the allocation of rare earth and transition metals in weld seam was discovered. Application of filler material, alloyed by rare earth metals increases mechanical properties of joint welds of high-strength aluminum-lithium alloys as compared with the indices, obtained for a welding variant using a serial filler material.

The work is executed within the frames of the complex scientific direction 10.8. «Fusion welding technologies of new structural materials» («The strategic direction of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: filler materials, welding, aluminum-lithium alloys, rare-earth metals, 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

В настоящее время интерес к использованию редкоземельных металлов (РЗМ) для металлургического производства и создания новых материалов с исключительными свойствами в России неуклонно растет. Объемы производства и потребления РЗМ в промышленно развитых странах мира уже на протяжении нескольких десятилетий являются показателями экономического развития. Использование РЗМ в металлургии основано на их высоком химическом сродстве к кислороду, сере, азоту и водороду, а также к примесям, которые ухудшают свойства сплавов. При взаимодействии РЗМ с этими элементами происходит очистка расплава путем образования прочных тугоплавких соединений. Эта группа металлов обладает также модифицирующим действием. Измельчение кристаллов металла достигается при введении незначительных количеств РЗМ [2–4].

Известно, что легирование РЗМ алюминиевых сплавов приводит к значительному повышению их свойств. Так, все алюминий-литиевые сплавы последнего поколения содержат в своем составе скандий. С учетом этого целесообразно введение РЗМ в состав присадочных материалов для сварки алюминиевых сплавов. Во ФГУП «ВИАМ» в последние годы разработаны новые алюминий-литиевые сплавы третьего поколения, такие как высокопрочные свариваемые сплавы В-1461 (системы Al–Cu–Li), содержащий цинк, и В-1469 (системы Al–Cu–Li), содержащий серебро. 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 ($\sigma_{в.сб} \leq 0,6\sigma_B$) [5–9].

Повысить эксплуатационные характеристики сварных соединений этих сплавов, выполненных сваркой плавлением, возможно путем применения 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. Наиболее перспективным направлением легирования алюминиевых сплавов является введение компонентов из групп переходных (Mn, Zr, Ti, Hf) и редкоземельных металлов. 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 твердо-жидкому, т. е. верхней границы температурного интервала хрупкости (ТИХ) и, таким образом, сужения его, а также снижения температуры начала линейной усадки и уменьшения напряжений в шве к моменту завершения кристаллизации [10–20].

Проблема горячих трещин приобрела особенно большую остроту в связи с развитием производства новых высокопрочных сплавов, так как области составов на диаграммах состояния, соответствующие максимальной прочности, часто совпадают с областью составов наиболее горячеломких сплавов. Именно к таким сплавам относятся высокопрочные алюминий-литиевые сплавы марок В-1461 и В-1469, поэтому разработка состава присадочного материала, который сможет улучшить свариваемость перспективных алюминиевых сплавов, является весьма актуальной задачей.

В настоящее время в качестве присадочного материала для сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов в России используют сплавы системы Al–Cu, например, марки Св-1201, 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 сварного соединения. Таким образом, с учетом значительного влияния РЗМ на свойства алюминиевых сплавов, целесообразно введение их в состав присадочных материалов для сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов системы Al–Cu–Li.

Материалы и методы

Исследования проводили на листовых полуфабрикатах высокопрочных алюминий-литиевых сплавов марок В-1461 (толщиной 2,5 мм) и В-1469 (толщиной 2,2 мм). Стойкость к образованию горячих трещин оценивали по методике МГТУ им. Н.Э. Баумана на 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 малоциклового усталости сварных соединений проводили согласно ГОСТ 25.502–79; ДТА проводили на установке для измерения теплотемкости DSC 404 F1 по РТМ 1.2.032–83. Определение локального химического состава материала проведено методами качественного и количественного микрорентгено-спектрального анализа на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA 10 (фирма Carl Zeiss, Великобритания), оснащенном энергодисперсионным спектрометром X-Max (фирма Oxford Instruments, Великобритания). Испытания на расслаивающую коррозию проводили по ГОСТ 9.904 в рабочих емкостях при полном погружении образцов в раствор 2 в течение 2 сут. Испытания на межкристаллитную коррозию проводили по ГОСТ 9.021 в рабочих емкостях при полном погружении образцов в раствор 2 в течение 6 ч при 300°C. Испытания на стойкость к коррозионному растрескиванию образцов сварных соединений проводили по ГОСТ 9.019–74 по четырехточечной системе изгиба, в растворе 3%-ного NaCl в течение 90 сут. Испытания на общую коррозионную стойкость проводили по ГОСТ 9.913 методом полного погружения образцов в раствор 3%-ный NaCl+0,1%-ный H₂O₂ в течение 90 сут.

Результаты

При сварке важен процесс формирования шва однородного состава, что обеспечивает высокое качество сварных соединений, требуемые механические свойства, а также минимизацию остаточных напряжений. Для обеспечения соответствия характеристик свариваемого материала и металла шва чаще всего рекомендуется использовать присадочный материал того же состава, что и основной или близкий к нему. Однако в случае с высокопрочными алюминий-литиевыми сплавами марок В-1461 и В-1469 такой подход не является целесообразным из-за низкой сопротивляемости сплавов горячим трещинам. Для этих сплавов следует разрабатывать присадочные материалы на основе системы Al–Cu с добавками эффективных модификаторов. Для исследования выбрали

Таблица 1

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

Маркировка присадки	Состав присадочных материалов (система)	$V_{кр}$, мм/мин, для сплава марки		Интервал кристаллизации ΔT , °C
		В-1461	В-1469	
1	Al-4Cu-Mn-Sc-Ti-Zr-Hf-Nd-Ag	1,8	2,7	70
2	Al-6Cu-Mn-Sc-Ti-Zr-Hf-Nd-Ag	3,5	3,64	88
3	Al-6Cu-Sc-Ti-Zr-Dy-Ag	2,34	2,48	77
4	Al-6Cu-Mn-Ti-Zr-Hf-Ce-Ag	3,42	3,1	88
5	Al-6Cu-Mn-Sc-Hf-Ce-Y	2,1	2,7	77
6	Al-6Cu-Mn-Sc-Ce-Nd-Dy	2,55	2,87	82
7	Al-6Cu-Mn-Sc-Hf-Dy-Ag	2,7	2,89	85
8	Al-10Cu-Mn-Sc-Ti-Zr-Hf-Nd-Ag	3,64	3,9	87
9	Al-10Cu-Sc-Ce-Nd-Dy	2,34	2,89	76
10	Al-10Cu-Mn-Hf-Ce-Nd-Dy	2,1	2,55	77
Св-1201	Al-6Cu-Mn-Ti-Zr	2,34	2,55	–

экспериментальные композиции присадочных материалов на основе системы Al-Cu, легированные Sc, Ti, Zr, Hf, Ce, Nd, Y, Dy, Ag.

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. Исследование влияния составов экспериментальных присадочных материалов на стойкость к образованию горячих трещин высокопрочных алюминий-литиевых сплавов марок В-1461 и В-1469 осуществляли по методике оценки трещиностойкости МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сварку проводили с использованием присадочных материалов экспериментальных составов (1–10) и серийной присадочной проволоки марки Св-1201 (табл. 1).

Для определения влияния системы легирования присадочного материала на значения трещиностойкости, характеризующиеся величиной эффективного интервала кристаллизации и запасом пластичности сплава в этом интервале, проводили определение значений температур ликвидус и солидус (интервал кристаллизации) изготовлен-

ных присадочных материалов с помощью дифференциального термического анализа (ДТА).

Результаты измерений фазовых превращений десяти экспериментальных составов присадочных материалов представлены в табл. 1.

Сравнительный анализ результатов ДТА и оценки стойкости к образованию горячих трещин позволяет предположить, что при достаточно большом интервале кристаллизации образующиеся в первый момент трещины успевают «залечиваться» еще не закристаллизовавшейся эвтектикой, повышая стойкость к образованию горячих трещин.

С целью установления характера распределения в сварном шве элементов, входящих в состав присадочных материалов, в том числе РЗМ (Sc, Nd, Dy) и Hf, проведен микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов марок В-1461 и В-1469, полученных методом аргонодуговой сварки. Анализ результатов МРСА показал, что РЗМ и Hf распределяются в шве следующим образом:

– гафний входит в состав интерметаллидных соединений, содержащих алюминий, медь и скандий, размером до 5 мкм (рис. 1, а);

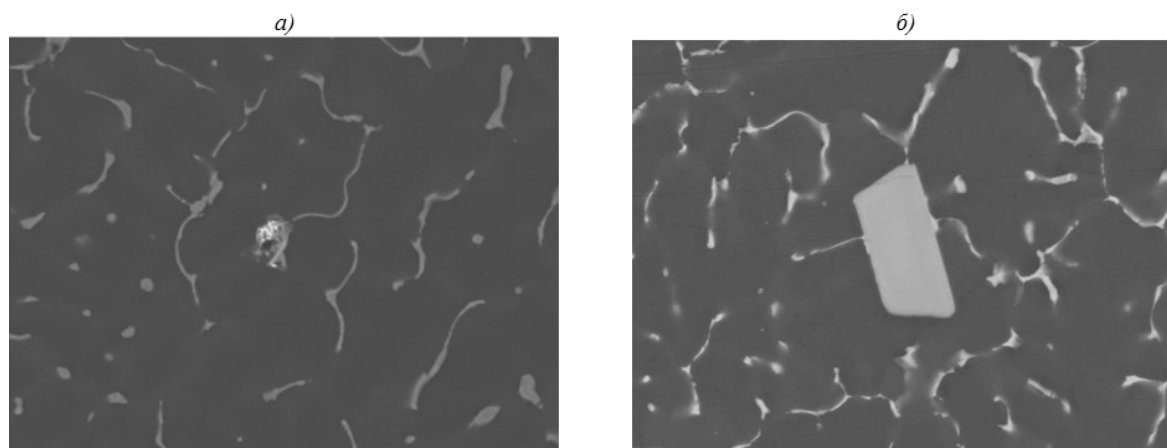


Рис. 1. Микроструктура сварного шва высокопрочного алюминий-литиевого сплава:
а – распределение Hf, Dy и Sc; б – распределение Nd и Sc

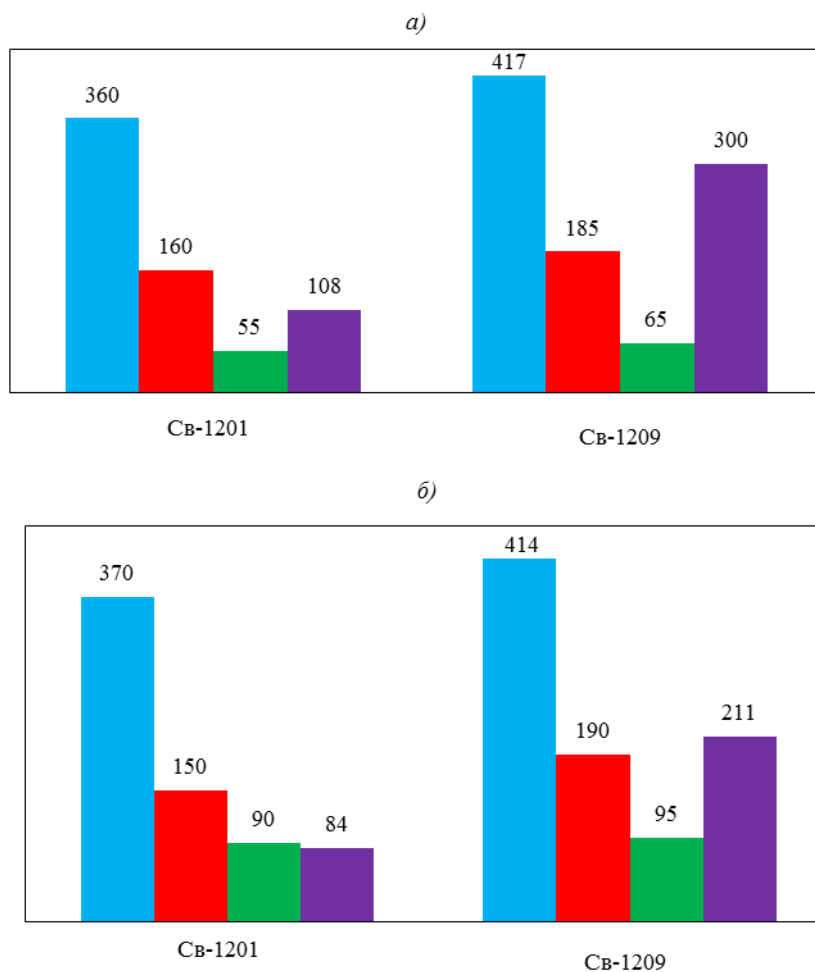


Рис. 2. Механические свойства сварных соединений, выполненных с присадочными проволоками марок Св-1201 и Св-1209, для сплавов В-1461 (а) и В-1469 (б):

■ – σ_b , МПа; ■ – КСУ, кДж/м²; ■ – α , град; ■ – МЦУ, цикл

– диспрозий присутствует по границам зерен в составе фазы Al_2Cu (рис. 1, а);

– скандий, помимо соединений с Hf, встречается в твердом растворе меди в алюминии, по границам зерен, а также в интерметаллидах, образованных неодимом (рис. 1);

– неодим способствует образованию крупных интерметаллидных соединений с алюминием, медью, титаном и скандием (рис. 1, б). Таким образом, РЗМ в сварном шве в основном присутствуют в виде отдельных интерметаллидных включений типа Al_3Sc , образующих дополнительные центры кристаллизации, а также могут находиться в составе основных упрочняющих фаз (S' , θ'), расположенных по границам зерен.

Поскольку крупные интерметаллиды могут привести к снижению механических характеристик сварных соединений, содержание Nd в составе присадочного материала следует ограничивать.

Полученные результаты позволили создать новый присадочный материал, легированный РЗМ, марки Св-1209. Провели также оценку меха-

нических характеристик высокопрочных алюминий-литиевых сплавов марок В-1461 и В-1469, изготовленных с новым присадочным материалом и серийной проволокой Св-1201 (рис. 2).

Как видно из сравнения показателей, полученных с использованием присадочного материала Св-1209 и серийной присадки Св-1201, содержащих приблизительно равное количество меди, легирование присадочных материалов РЗМ позволит повысить прочность сварных соединений на 12–13%, ударную вязкость – на 22–26%, пластичность – на 8–18%, МЦУ – в 2,5–3 раза, в зависимости от марки свариваемого сплава. Таким образом, можно утверждать, что добавки РЗМ положительно влияют на все механические характеристики сварных соединений.

Проводили исследования на склонность сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов марок В-1461 и В-1469, изготовленных с присадкой Св-1209, к расслаивающей (РСК), межкристаллитной (МКК) и общей коррозии (ОК) и коррозионному растрескиванию (КР). Анализ

Таблица 2

Коррозионная стойкость сварных соединений сплавов марок В-1461 и В-1469 с присадочным материалом марки Св-1209

Свойства	Сплав	Место определения	Значения свойств
Склонность к РСК, балл	В-1461	Основной металл	3–5
		ЗТВ	7–8
		Сварной шов	2
	В-1469	Основной металл	5
		ЗТВ	2
		Сварной шов	2
Склонность к МКК, мм	В-1461	Основной металл	Отсутствует
		ЗТВ	0,23–0,26
		Сварной шов	0,19–0,21
	В-1469	Основной металл	0–0,1
		ЗТВ	0,11–0,16
		Сварной шов	0–0,18
Общая коррозия по потере механических свойств σ_b , %	В-1461	–	18
	В-1469	–	17
Коррозионное растрескивание: $\sigma_{кр}$ (при постоянной нагрузке) в продольном направлении, МПа	В-1461	–	275
	В-1469	–	275

результатов показал (табл. 2), что сварные соединения характеризуются удовлетворительной коррозионной стойкостью. Незначительное снижение стойкости к РСК и МКК наблюдается для зоны термического влияния (ЗТВ) сплава В-1461.

Обсуждение и заключения

Проведено исследование влияния легирования РЗМ присадочного материала для сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов марок В-1461 и В-1469. Установлена корреляция между стойкостью к образованию горячих трещин высокопрочных алюминий-литиевых сплавов (в зависимости от химического состава исследуемых присадочных материалов) и интервалом кристаллизации, увеличение которого благодаря наличию незакристаллизовавшейся эвтектики обеспечивает «залечивание» образующихся трещин на последующем этапе формирования шва.

Показано, что РЗМ, обеспечивающие формирование мелкозернистой структуры и оптималь-

ные условия кристаллизации сварного шва, присутствуют в виде отдельных интерметаллидных включений типа Al_3Sc , а также могут находиться в составе основных упрочняющих фаз (S' , θ'), расположенных по границам зерен.

Оптимизирован химический состав нового присадочного материала на основе системы Al–Cu, легированного РЗМ, что обеспечило улучшение показателей свариваемости высокопрочных алюминий-литиевых сплавов третьего поколения, при этом прочность сварных соединений повышается на 12–13%, ударная вязкость – на 22–26%, пластичность – на 8–18%, МЦУ – в 2,5–3 раза по сравнению со свойствами сварных соединений, выполненных с использованием серийного присадочного материала Св-1201.

Сварные соединения высокопрочных алюминий-литиевых сплавов марок В-1461 и В-1469, выполненные с присадочным материалом, легированным РЗМ, обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью.

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., 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: 18.09.2016).
3. 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.
4. Скупов А.А., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. Новые присадочные материалы для сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №9. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-4-4.
5. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Перспективные алюминиевые сплавы и технологии их

- соединения для изделий авиакосмической техники // *Алюминий-21. Сварка и пайка: тез. докл. 2-й Междунар. конф.* СПб., 2012. Ст. 08.
6. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Жегина И.П., Иода Е.Н., Лоскутов В.М. Особенности и перспективы сварки алюминий-литиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии.* 2002. №4. С. 3–12.
 7. 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: 07.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-6-6.
 8. Lukin V.I., Ioda E.N., Skupov A.A., Ovchinnikov V.V. Friction stir welding of V-1461 and V-1469 high strength aluminium-lithium alloys // *Welding International.* 2016. Vol. 30. No.7. P. 552–556.
 9. Лукин В.И., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А. Особенности лазерной сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №10. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.12.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-7-7.
 10. 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.
 11. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Антипов В.В., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А. Эффективность применения присадочных материалов при лазерной сварке высокопрочных алюминий-литиевых сплавов // *Сварочное производство.* 2016. №10. С. 17–21.
 12. Рябов Д.К., Колобнев Н.И., Иванова А.О. Влияние добавок кобальта и скандия на механические характеристики и коррозионную стойкость профилей из среднепрочного сплава системы Al–Zn–Mg с добавкой меди // *Труды ВИАМ. электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №6. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-1-1.
 13. Захаров В.В. Особенности кристаллизации алюминиевых сплавов, легированных скандием // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2011. №9. С. 12–18.
 14. Филатов Ю.А., Байдин Н.Г., Доброжинская Р.И., Хамнагдаева Е.А., Овсянников Б.В. Новый термически неупрочняемый свариваемый криогенный сплав 1545K системы Al–Mg–Sc // *Технология легких сплавов.* 2014. №1. С. 32–36.
 15. Шиганов И.Н., Холопов А.А., Трушников А.В., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А. Лазерная сварка высокопрочных алюминий-литиевых сплавов с присадочной проволокой // *Сварочное производство.* 2016. №6. С. 44–50.
 16. Шалин Р.Е., Ефремов И.С., Яровинский Ю.Л., Лукин В.И. Опыт проектирования и изготовления крупногабаритных конструкций из алюминий-литиевых сплавов изделий ракетно-космической техники // *Сварочное производство.* 1996. №11. С. 14–18.
 17. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В., Лавренчук В.П., Котельникова Л.В., Оглодков М.С. Повышение надежности сварных соединений из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1461 // *Сварочное производство.* 2010. №11. С. 14–17.
 18. Lukin V.I., Arbutov Yu.P., Grushko O.E. Chemical elements affecting the weldability of Al–Mg–Li alloys // *Welding International.* 1994. Vol. 8. No. 9. P. 725–727.
 19. Lukin V.I. Effect of alloying elements Sc, Mn, and Zr on weldability of alloys of the Al–Mg–Sc–Mn–Zr system // *Welding International.* 1996. Vol. 10. No. 12. P. 987–989.
 20. Лукин В.И. Sc – перспективный легирующий элемент для присадочных материалов // *Сварочное производство.* 1995. №6. С. 13–14.