

УДК 669.715:669.884

Л.Б. Хохлатова¹, В.В. Блинков², Д.И. Кондратюк²,
Е.Н. Рябова¹, О.К. Колесенкова¹

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВОВ 1424 И В-1461, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-9-13

Проведено исследование механических свойств и структуры сварных соединений, изготовленных лазерной сваркой листов из сплавов В-1461-БТ1 и 1424-БТГ1 соответственно толщиной 1,5 и 1,8 мм с технологической плакировкой. Лазерная сварка листов проводилась с применением универсального комплекса на базе иттербиевого волоконного лазера ЛС-2 фирмы «ИРЭ-Полус» без использования присадочного материала. Сварные соединения листов из высокопрочного сплава В-1461 превосходят сварные соединения листов из сплава 1424 по малоцикловой усталости, но уступают по прочности и углу изгиба при статических испытаниях на изгиб.

Ключевые слова: алюминий-литиевые сплавы, лазерная сварка, механические свойства.

The undertaken investigation is focused on mechanical properties and structure of joints of sheets from V-1461-BT1 and 1424-BTG1 alloys made by laser welding of 1,5 and 1,8 mm in thickness with processing cladding respectively. The sheets were welded without welding consumables with the use of universal welding complex based on ytterbium optical fiber laser LS-2 produced by «IRE-Polus». Welded joints of sheets from high-strength V-1461 alloy exceed joints of sheets from 1424 alloy in LCF by several times, but concede in respect of strength and bending angle at static bending test.

Keywords: Al-Li alloys, laser beam welding, mechanical properties.

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

²Открытое акционерное общество «Национальный институт авиационных технологий» [Join Stock Company «National Institute of Aviation Technologies»] E-mail: info@niat.ru

Введение

Лазерная сварка является одним из перспективных процессов сварки алюминиевых сплавов, которые могут быть использованы в авиастроении [1–4]. Уникален опыт фирмы Airbus по замене клепаных конструкций на изделия, изготовленные лазерной сваркой [5, 6]. В настоящее время лазерная сварка успешно применяется при изготовлении панелей нижней части фюзеляжа самолетов А318, А340-600 НГМ и А380 (в рамках этого проекта стрингер соединяется с обшивкой панелей). Лазерная сварка по сравнению с традиционными методами клепки позволяет снизить массу конструкции на 15% [5].

Применение лазерных технологий при сварке алюминий-литиевых сплавов позволяет снизить образование пор и оксидных включений в сварных соединениях благодаря интенсивному перемешиванию при течи расплавленного металла в канале проплавления – от фронта к хвостовой части сварочной ванны. Ширина шва сварного соединения уменьшается в 2–5 раз по сравнению со сварным швом после дуговой сварки, что связано с высокой концентрацией энергии лазерного луча, уменьшающего объем сварочной ванны. Малый объем расплавленного металла и специфическая форма шва улучшают условия кристаллизации,

что повышает технологическую прочность и механические свойства сварных соединений, а также снижает уровень остаточной деформации [7–9].

Материалы и методы

Объектом исследования являлись листы толщиной 1,5 мм – из сплава В-1461-БТ1 [10–12] и 1,8 мм – из сплава 1424-БТГ1 [13–15] с технологической плакировкой толщиной не более 1,5% на каждую сторону. Листовые заготовки под сварку предварительно фрезеровали по свариваемым кромкам для обеспечения необходимой шероховатости поверхности ($R_z \leq 20$ мкм). Перед сваркой поверхности заготовок подвергали обезжириванию, химическому травлению и зачистке до блеска шабером. Необходимо отметить, что подготовка поверхности под сварку не включала химическое фрезерование, обязательное для алюминий-литиевых сплавов [16].

Лазерную сварку (ЛС) листов алюминий-литиевых сплавов проводили с применением универсального комплекса на базе иттербиевого волоконного лазера ЛС-2 фирмы «ИРЭ-Полус» без использования присадочного материала, применение которого так же, как и применение химического фрезерования, обеспечивает отсутствие пористости в сварных соединениях, что позволяет повысить их механические свойства [7].

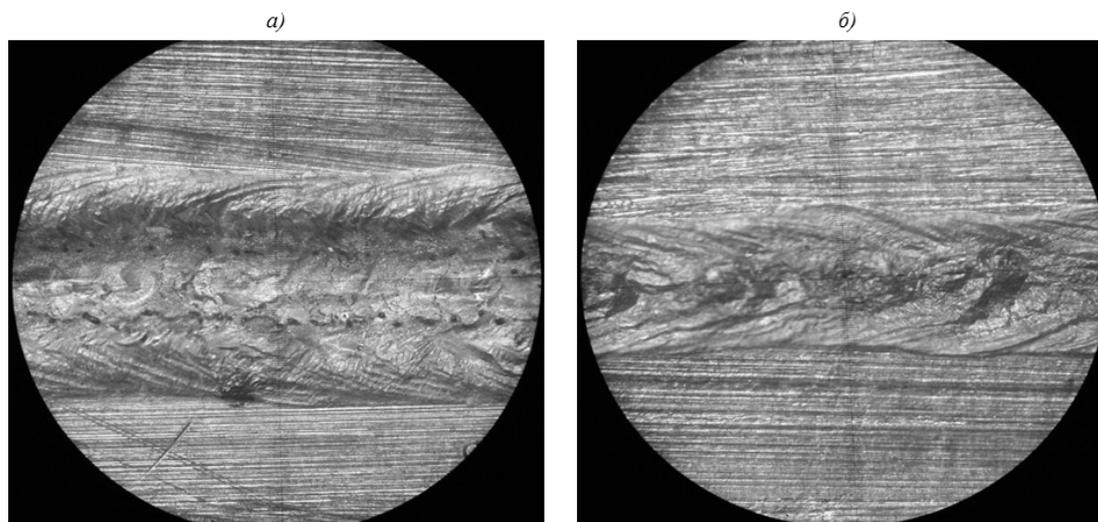


Рис. 1. Вид лицевой (а) и корневой (б) частей валика сварного шва без подачи защитного газа

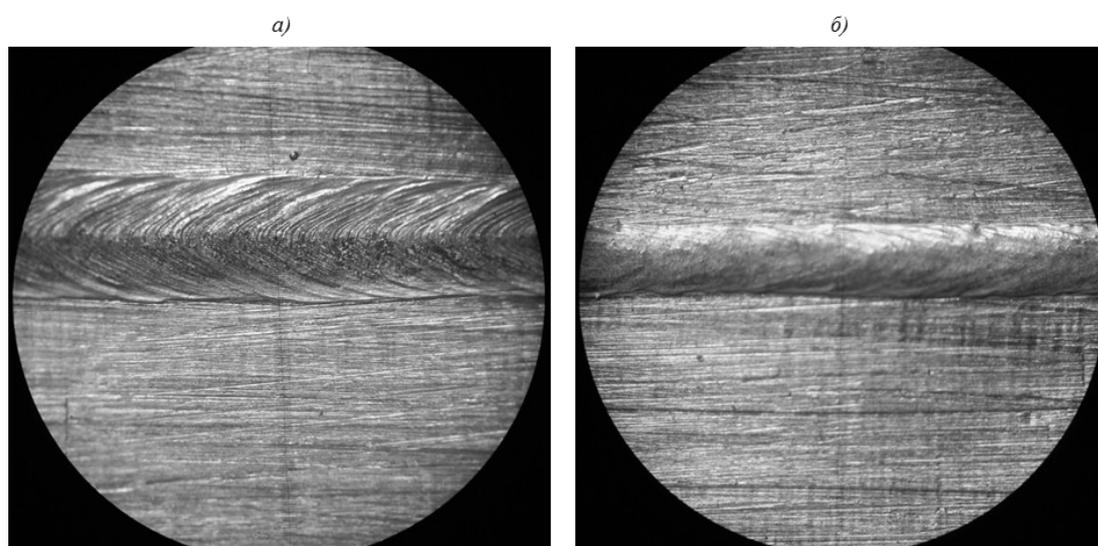


Рис. 2. Формирование лицевой (а) и корневой (б) части сварного шва при оптимальном расходе защитного газа 10 (а) и 5 л/мин (б)



Рис. 3. Зажим свариваемых пластин в специальной технологической оснастке для сварки плоских образцов с системой защиты корневой части шва

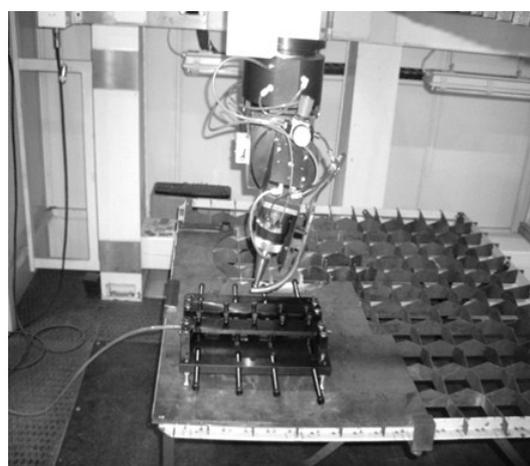


Рис. 4. Сварочная оптическая головка с коаксиальной подачей защитного газа и дополнительным козырьком

Для защиты металла лицевой стороны сварного шва и его корневой части использовался аргон. Подача аргона к корню шва необходима не только для защиты, но и для увеличения силы поверхностного натяжения металла, что позволяет избежать провисания и подрезов в шве (рис. 1 и 2). Оптимальный расход аргона для защиты металла с лицевой стороны шва составил 10–15 л/мин, для корневой части 5–8 л/мин.

Свариваемые пластины зажимались в специальной технологической оснастке для сварки плоских образцов с системой защиты корневой части шва (рис. 3). Внешний вид сварочной оптической головки с коаксиальной подачей защитного газа и дополнительными козырьком показан на рис. 4.

Основными параметрами процесса лазерной сварки являются: мощность лазерного излучения $W_{\text{л}}$, Вт; скорость сварки $V_{\text{св}}$, м/мин; положение фокальной плоскости относительно поверхности свариваемых деталей ΔF (заглубление), мм; расход защитного газа P , л/мин. В экспериментах использовалась фокусирующая система с фокусным расстоянием $F=150$ мм.

Режимы ЛС, обеспечивающие получение качественного сварного шва, для сплавов В-1461-БТ1 и 1424-БТГ1 отличаются только мощностью лазерного излучения, которое зависит от толщины листа.

Уровень остаточных напряжений в сварных соединениях определяли методом рентгеновской съемки образцов на анализаторе остаточных напряжений в $\text{Cg } K_{\alpha}$ -излучении методом изонаклона ($U=30$ кВ, $I=8$ мА) в соответствии с ММ1.595-17-225–2004.

Зернистую структуру сварных соединений выявляли с помощью анодного оксидирования микрошлифов в 2%-ном растворе бородитородной кислоты на установке электролитической полировки с пропусканием постоянного электрического тока в течение 1,5–2 мин ($U=18$ –20 В).

Микротвердость по Виккерсу ($\text{HV}_{0,2}$) сварных соединений измеряли на автоматизированном твердомере Emco Test DuraJet-10 в соответствии с ГОСТ 6996. Исследование локального химического состава образцов проводили методом количественного микрорентгеноспектрального анализа на аппарате «Суперпроб-733» (ЖСМА-733, фирма Jeol, Япония) с использованием энергодисперсионного микроанализатора Inca Energy (локальность анализа 1 мкм^2 , глубина анализа 1 мкм).

Испытания при растяжении проводили на испытательной машине Zwick Roell Z100 в соответствии с ГОСТ 1497, на ударную вязкость на образцах с U-образным надрезом (КСУ) – на маятниковом копре КМ-1, на малоцикловую усталость (МЦУ) – при напряжениях 157; 176 и 196 МПа с частотой нагружения 40 Гц и коэффициентом асимметрии $R=0,1$ (по ГОСТ 25.502). Испытания на межкристаллитную коррозию (МКК) и расслаивающую коррозию (РСК) проводили по ГОСТ 9.021 и по ГОСТ 9.904 соответственно.

Фрактографическое исследование изломов сварных соединений проводили на образцах после испытания на МЦУ с помощью растрового электронного микроскопа в соответствии с требованиями ММ1.2 020–2002.

Результаты

Измерения остаточных напряжений в сварных листовых соединениях из сплавов В-1461-БТ1 и 1424-БТГ1 проводили в поперечном направлении (поперек шва) в двух точках в зоне шва и околошовной зоне и в трех точках в основном металле (на расстоянии 5–7 мм от шва). Результаты измерений показали, что в сплаве В-1461 в зоне шва напряжения сжимающие, в остальных точках измерения – растягивающие (табл. 1). В сплаве 1424 напряжения во всех исследуемых точках растягивающие. Уровень остаточных напряжений невысокий: 14–48 МПа для сварных соединений из сплава В-1461 и 24–65 МПа для сварных соединений из сплава 1424.

Анализ микроструктуры в зоне лазерной сварки показал, что для сплава В-1461 структура в центре сварного шва равноосная, с величиной зерна 40–60 мкм (рис. 5, а). В переходной зоне наблюдаются вытянутые в направлении теплоотвода зерна и ободок мелкого рекристаллизованного зерна (рис. 5, б). В сварном шве сплава 1424 имеет место чередование зон с мелким зерном размером 5–8 мкм и зон с вытянутым в направлении теплоотвода зерном размером 60–80 мкм (рис. 6).

Вследствие больших скоростей охлаждения наблюдается резкий переход от сварного шва к основному металлу. Структурных изменений в зоне термического влияния не наблюдается.

Величину зоны термического влияния определяли для каждого сплава по распределению микротвердости ($\text{HV}_{0,2}$) в сварных соединениях. Высокотвердый сплав В-1461 показал более резкое снижение значений микротвердости в переходной зоне сварного соединения, по которой и происходит разрушение при определении механических свойств. Величина зоны термического влияния для сплава В-1461 составляет 3–5 мм. Сварные соединения листов из сплава 1424 характеризуются более равномерным распределением $\text{HV}_{0,2}$, отсутствием резкого разупрочнения и величиной зоны термического влияния ~3 мм (рис. 7).

Исследования локального химического состава сварных соединений методом количественного МРСА показали, что химический состав сварных швов сплавов 1424 и В-1461 практически не отличается от основного материала. В шве и основном материале из сплава 1424 обнаружены частицы с повышенной концентрацией Sc и Zr, содержащие Ti и Zn, предположительно $\text{Al}(\text{ZrSc})_3$ и частицы с повышенной концентрацией Mn и Fe, содержащие Sc и Ni, предположительно $\text{Al}_3(\text{MnFe})$. В шве и основном материале сплава В-1461 обнаружены частицы с высокой концентрацией Cu, содержащие Mn, Fe, Ni и Zn, предположительно CuAl_2 .

Таблица 1

Результаты измерения напряжения в сварных соединениях листов

Сплав	Остаточное напряжение, МПа, в точках						
	1	2	3	4	5	6	7
	Шов		Околошовная зона		Основной металл		
В-1461	-16±10	38±12	28±19	20±15	48±22	37±15	14±11
1424	65±7	39±14	30±18	39±14	26±19	33±12	24±15

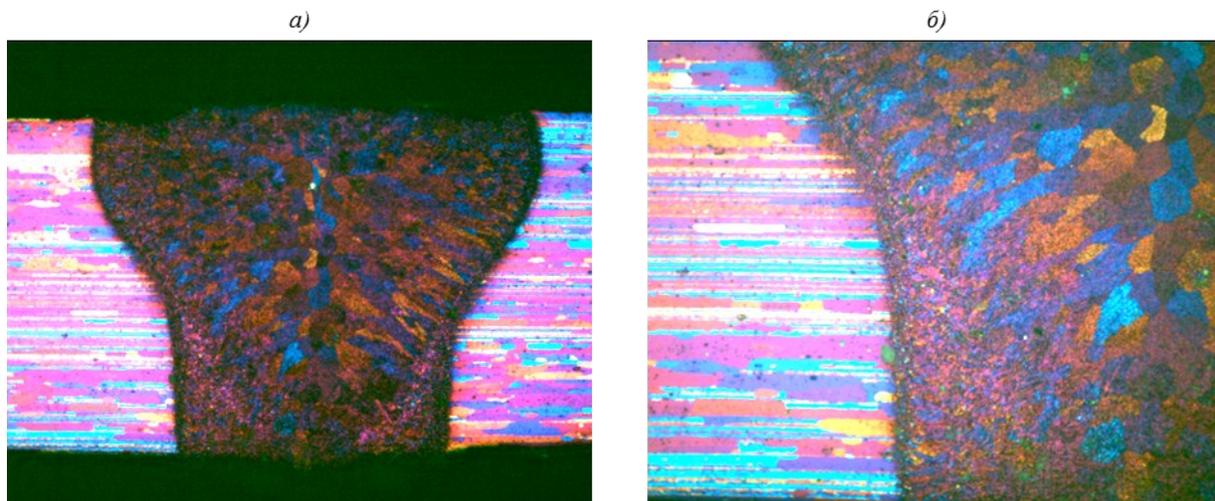


Рис. 5. Микроструктура (а – ×50, б – ×100) сварного соединения листов из сплава В-1461

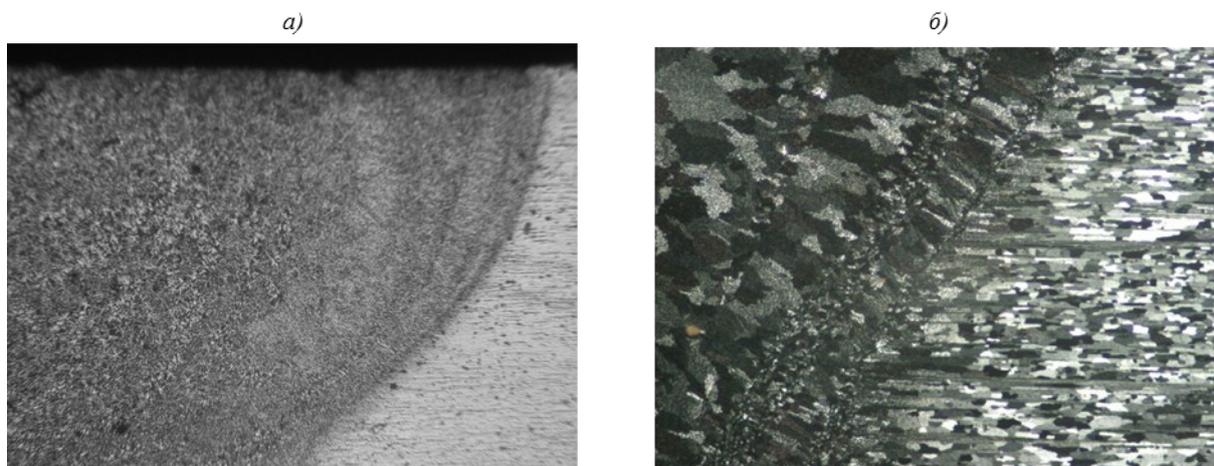


Рис. 6. Микроструктура (а – ×100; б – ×200) сварного соединения листов из сплава В-1424



Рис. 7. Распределение микротвердости в сварных соединениях сплавов В-1461 (—) и 1424 (- - -)

Таблица 2

Свойства сварных соединений листов (поперечное направление)

Сплав	σ_b , МПа	КСУ, кДж/м ²	α , град	МЦУ: N , кцикл, при $\sigma_{\max}^{\text{нетто}}$, МПа		
				157	176	197
В-1461	<u>305–315</u> 310	<u>95–123</u> 110	<u>55–68</u> 64	<u>395–640</u> 534	–	147
1424	<u>340–350</u> 345	<u>109–136</u> 123	<u>103–154</u> 121	<u>67–200</u> 122	<u>49–72</u> 59	–

На образцах, вырезанных из сварных соединений листов из сплавов В-1461 и 1424, проведены испытания механических свойств при растяжении (σ_b), на статический изгиб (α), ударную вязкость с U-образным надрезом (КСУ) и малоцикловую усталость (табл. 2).

Сварные соединения листов из высокопрочного сплава В-1461 превосходят сварные соединения листов из сплава 1424 по малоциклового усталости, но уступают по прочности и углу изгиба при статических испытаниях на изгиб. Сварные соединения листов из сплава 1424 обладают высокой коррозионной стойкостью: РСК соответствует 3-му баллу и в шве, и зоне термического влияния, и основном металле; МКК в сварных соединениях обоих сплавов отсутствует.

Фрактографические исследования изломов сварных образцов после испытаний на МЦУ показали, что характер разрушения во всех образцах многоочаговый, развивается с обеих сторон от дефектов поверхности, пор, несплавлений или рыхлот, а в зоне статического долома – разрушение внутризеренное с образованием мелкоячеистого рельефа.

Обсуждение и заключения

Проведено исследование механических свойств и структуры сварных соединений, изготовленных лазерной сваркой листов толщиной 1,5 и 1,8 мм с технологической плакировкой из сплавов В-1461-БТ1 и 1424-БТГ1 соответственно. Уровень остаточных напряжений в сварных соединениях листов из сплавов В-1461 и 1424, выполненных лазерной сваркой, не превышает 48 МПа. Локальный химический состав сварных швов практически не отличается от основного материала. Сварные соединения, выполненные лазерной сваркой листов из сплава 1424, имеют высокий уровень свойств: $\sigma_{\text{св}}/\sigma_b=0,79$; КСУ=109–136 кДж/м²; $\alpha=103$ –154 град. Сварные соединения листов из высокопрочного сплава В-1461 обладают высокой долговечностью (МЦУ: $N=530$ кцикл при $\sigma_{\max}^{\text{нетто}}=157$ МПа).

Применение присадочного материала, химического фрезерования при подготовке поверхности основного и присадочного материала позволит существенно улучшить качество и повысить свойства сварных соединений из новых алюминий-литиевых сплавов третьего поколения 1424 и В-1461.

ЛИТЕРАТУРА

- Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Антипов В.В. Перспективные алюминий-литиевые сплавы для самолетных конструкций //Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 35–38.
- Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 183–195.
- 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.
- Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Оглодков М.С., Михайлов Е.Д. Алюминийлитиевые сплавы для самолетостроения //Металлург. 2012. №5. С. 31–35.
- Дитрих Д., Бренер Б. Прогресс в лазерной сварке панелей фюзеляжа //Авиационная промышленность. 2011. №4. С. 10–20.
- Дитрих Д., Бренер Б. Применение технологий лазерной сварки при изготовлении интегральных конструкций обшивки фюзеляжа гражданских крупногабаритных самолетов //Авиационная промышленность. 2011. №1. С. 1–7.
- Шигапов И.Н., Шахов С.В., Холопов А.А. Лазерная сварка алюминийевых сплавов //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. С. 34–50.
- Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Попов В.И., Овчинников В.В., Шамрай В.Ф. Структура, технологические свойства и свариваемость листов из сплава В-1341 системы Al–Mg–Si //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 3–8.
- Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Промышленное освоение высокопрочного сплава В-1469 системы Al–Cu–Li–Mg //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 01 (viam-works.ru).
- Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И., Коваль Ю.Н. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства. К.: Наукова думка. 1992. 192 с.
- Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него: пат. 2163940 Рос. Федерация; опубл. 10.03.2001.
- Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Алексеев А.А., Лукина Е.А. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al–Cu–Mg–Li–Zn //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 7–11.
- Сплав на основе алюминия и способ его термической обработки: пат. 2133295 Рос. Федерация; опубл. 20.07.1999.
- Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Антипов В.В., Каримова С.А., Рудаков А.Г., Оглодков М.С. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминийевых сплавах //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 16–20.
- Панин В.Е., Каблов Е.Н., Почивалов Ю.И., Панин С.В., Колобнев Н.И. Влияние наноструктурирования поверхностного слоя алюминий-литиевого сплава 1424 на механизмы деформации, технологические характеристики и усталостную долговечность. Повышение пластичности и технологических характеристик //Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. №6. С. 107–111.
- ПИ 4.1555–2000 «Сварка дуговая алюминийевых и магниевых сплавов в среде инертных газов».