

СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ВЫСОКОПРОЧНОГО СВАРИВАЕМОГО АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА 1460

© А. Л. Лимаренко, В. Г. Ситало, Т. Н. Литвишко

Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля

Використання алюмінієво-літєвого сплаву марки 1460, що має підвищену питому міцність, задовільну зварюваність і корозійну стійкість, у виробках ДКБ «Південне», може призвести до зменшення маси високонавантажених вузлів (на 20—25 %) та до збільшення корисного навантаження.

Одним из перспективных направлений снижения веса конструкций является применение сплавов алюминий-литиевой группы, которые имеют на 6—10 % меньшую плотность, чем традиционные высокопрочные алюминиевые сплавы, а также повышенный до 12 % модуль упругости и значительное повышение прочностных характеристик. Начало промышленному применению алюминий-литиевых сплавов положил сплав 1420 (система Al-Mg-Li). В дальнейшем в зависимости от поставленных задач организациями ВИАМ, ВИЛС, КУМЗ был разработан ряд сплавов, способных заменить традиционные высокопрочные алюминиевые сплавы.

Алюминиевые сплавы, легированные литием, относятся к стареющим системам и отличаются сложностью фазовых и структурных превращений в процессе их термообработки. Эти изменения оказывают влияние на характеристики трещиностойкости, вязкости разрушения, коррозионной стойкости и сопротивления циклическим нагрузкам. На формирование структуры в сплавах особенно сильное влияние оказывает температура нагрева и скорость охлаждения при закалке, режим искусственного старения и применение правки растяжением между закалкой и старением.

В 1986 году было принято решение о модернизации кабинного модуля «Буран» и создания в НПО «Молния» многоцелевой авиационно-космической системы (МАКС: самолет-носитель «Мрия» + орбитальный самолет со сменными целевыми модулями + внешний топливный бак). Для этих целей была начата разработка в ВИАМ нового свариваемого алюминий-литиевого сплава 1460 (система Al-Cu-Li), работающего при повышенных (до 150 °C) и при криогенных (до -253 °C) температурах. Изготовлены опытно-промышленные партии полу-

фабрикатов, необходимых для изготовления криогенного бака и кабинного модуля: раскатные кольца, штамповки, горяче- и холоднокатанные листы, плиты, прессованные панели и профили.

Сплав 1460 (2.6 — 3.3 % Cu; 2.0 — 2.4 % Li; 0.06 — 0.12 % Sc; 0.08 — 0.13 % Zr) разработан для создания сварных авиакосмических систем для замены свариваемого сплава 1201, удовлетворительно работающего при криогенных температурах. Однако низкая удельная прочность и низкие усталостные характеристики сплава 1201 не позволяли использовать его в новейших авиакосмических разработках.

Сплав 1460 применяется в термоупрочненном состоянии (закалка 533 °C, вода + деформация растяжением + старение 160 °C, 24 часа). В результате термической обработки в сплаве формируется сложная многофазная структура [2]. Внутри зерен относительно равномерно распределяется упорядоченная фаза α' (Al_3Sc) в форме дисков, а также сферические фазы δ' (Al_3Li) и β' (Al_3Zr). Эти же фазы более крупных размеров крайне неоднородно располагаются на границах зерен; они отмечаются в виде небольших скоплений, и не во всех зернах. Скандий содержится и в композитных двухслойных частицах, сердцевина которых состоит из Al_3Sc , а оболочка — из Al_3Li . Кроме них встречаются частицы фазы T_1 (Al_2CuLi) в виде стержней, которые распределяются внутри зерен относительно равномерно, а по границам зерна образуют прерывистую цепочку. Фаза θ_1 (Al_2Cu) обнаруживается на границах зерен только в отдельных участках сплава.

Основной вклад в упрочнение вносит не образование частиц T_1 , а происходящее при их выделении изменение фазы δ' , при котором рыхлые конгломераты δ превращаются в монолиты δ' [1]. Проведен-

ная оценка влияния фазового состава на изменение свойств при криогенных температурах позволила сделать вывод о том, что по мере увеличения фазы T_1 происходит повышение чувствительности к концентраторам напряжения и снижения пластичности при криогенных температурах. Было показано, что оптимальной фазовой областью старения сплава, предназначенного для работы в условиях криогенных температур является $\alpha + \delta' + \theta + (\theta')$.

Добавка Sc способствовала измельчению выделений фазы δ' , θ' , повышению плотности выделений фазы θ' , а также появлению большого числа композитных частиц δ'/Al (Sc, Zr), что обеспечивало дополнительное упрочнение сплава. Положительное влияние Sc проявилось также и в том, что появление большого числа малоугловых границ (размер субграниц у сплава со Sc 1—2 мкм) привело к значительному измельчению зернограницных выделений T_1 на начальной стадии их появления, которого нельзя было избежать [1].

Магний уже в небольших количествах вызывает значительное увеличение прочностных свойств сплава при естественном старении, а при искусственном старении активизирует образование фазы T_1 . Это еще одна причина, по которой Mg не применяется для легирования сплава 1460, так как в этом случае рабочие нагревы будут вызывать распад твердого раствора с появлением фазы T_1 , что вызывает охрупчивание сплава при криогенных температурах.

Разработаны технологии производства из сплава 1460 горяче- и холоднокатаных листов, прессованных панелей и профилей, раскатных колец, поковок и штамповок, тонких плит. Сплав 1460 наиболее технологичен из существующих алюминиево-

литиевых сплавов. Однако, как и для других Al-Li сплавов, плиты толщиной более 20 мм и массивные кованные полуфабрикаты (свыше 100 мм) после полной обработки имеют пониженные значения пластичности и вязкости разрушения в высотном направлении, что связано с проблемой прокаливаемости сплава.

Типичные механические свойства различных полуфабрикатов из сплава 1460T1 приведены в табл. 4. Механические свойства неплакированных листов 1.5—10.0 мм в закаленном и искусственном состаренном состоянии согласно термическим условиям на поставку ТУ 1-804-342-95 составляют:

при нормальной температуре — $\sigma_b \geq 490$ МПа; $\sigma_{0.2} \geq 431$ МПа; $\delta \geq 4$ %;

при температуре -196 °С — $\sigma_b \geq 560$ МПа; $\sigma_{0.2} \geq 500$ МПа; $\delta \geq 4$ %, что значительно ниже декларируемых типичных свойств сплава.

Для обеспечения оптимальных механических свойств в зависимости от условий работы (нормальная — криогенная температура) для каждого вида полуфабрикатов существует определенный режим старения при термообработке. При этом в структуре сплава образуется определенный фазовый состав.

Сплав 1460 после закалки (при отсутствии в нем магния) не изменяет своих свойств в процессе естественного старения, сохраняя в течение длительного времени высокую пластичность (18 %) и низкий предел текучести (140 МПа). Это позволяет значительно упростить технологию изготовления полуфабрикатов и деталей, а также использовать различные схемы термомеханической обработки, включающей деформацию сплава после закалки перед искусственным старением. Строго регламен-

Таблица 1. Выделения в алюминиево-литиевых сплавах при термообработке

Система	Марка сплава	Сумма легирующих элементов для среднего атомного состава, %	Зернограницные выделения	Выделения в матрице
Al-Mg-Li	1420	12.7	S_1 (Al ₂ MgLi)	δ' (Al ₃ Li), β' (Al ₃ Zr)
	1423	11.0	S_1 (Al ₂ MgLi)	δ' (Al ₃ Li), β' (Al ₃ Zr), α' (Al ₃ Sc)
Al-Li-Cu-Mg	1430	9.5	S (Al ₂ CuMg), T_2 (Al ₆ CuLi ₃)	δ' (Al ₃ Li), T_1 (Al ₂ CuLi), θ (Al ₂ Cu), β' (Al ₃ Zr)
	1440			
	1470			
	2091	9.8		
	8090	10.6		
Al-Cu-Li	8091			
	1450	9.0	T_1 (Al ₂ CuLi), θ (Al ₂ Cu), T_2 (Al ₆ CuLi ₃)	δ' (Al ₃ Li), β' (Al ₃ Zr), S' (Al ₂ CuMg)
	1451	7.3		
	1460	9.5		
	2090	9.1		

Таблица 2. Свойства листов сплава 1460 с различной структурой

Структура листов	Продольное			Поперечное		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Нерекристаллизованная	545	475	7.7	585	510	6.8
Нерекристаллизованная с сеткой рекристаллизованных зерен на месте полос сдвига	535	470	4.3	590	495	10.7
Рекристаллизованная	525	465	14.5	560	570	8.5

Таблица 3. Свойства сварных соединений сплава 1460

Термическая обработка		T, °C	σ_B , МПа			α , град
до сварки	после сварки		основной материал	сварное соединение	шов	
T1 (закалка + деформация + иск. старение)	—	20	540	360	320	60
		-253	760	460	400	—
T1	Искусств. старение	20	—	390	350	40
		-253	—	490	430	—
Горячедеформированное	T1	20	—	450	460	25
		-253	—	550	560	—

тированная деформация после закалки в сечении с определенным режимом окончательного старения должна обеспечить необходимый комплекс физико-механических свойств.

Исследованы полосы сдвига, возникающие при холодной прокатке в листах сплава 1460 и оказывающие отрицательное влияние на их свойства [3]. Полосы сдвига могут образоваться и при любой другой холодной деформации алюминиево-литиевых сплавов. Они возникают при правке растяжением закаленных листов, профилей и других полуфабрикатов, формовке листов в естественно состаренном состоянии после закалки или закалки и искусственного старения, а также в процессе испытаний при различных видах нагружения, растяжение, изгиб, знакопеременное нагружение. При пластической деформации происходит формирование и развитие полос сдвига, возможна их трансформация в трещины, обуславливающие в конечном итоге разрушение. Разрушение по полосам сдвига — это особенность алюминиево-литиевых сплавов.

Полосы сдвига формируются в результате развития сосредоточенной пластической деформации. Склонность к локализации пластической деформации на плоскостях скольжения в алюминиевых сплавах с литием объясняется наличием большого количества дисперсных частиц фаз: δ' (Al_3Li). Частицы этих фаз когерентны алюминиевой матрице и могут прорезаться скользящими парными дислокациями, что в конечном итоге приводит к локализации пластической деформации в полосах сдвига.

В табл. 2 приведены свойства листов сплава 1460T1 (после закалки и искусственного старения) с различной структурой.

Появление в структуре листов сетки рекристаллизованных зерен по бывшим полосам сдвига неблагоприятно влияет на механические свойства: относительное удлинение в продольном направлении снижается и появляется «обратная» анизотропия. На поверхности образцов видны параллельные полосы (нормальные к направлению приложенной силы), которые являются местами выхода деформации, локализованной в «сетке» рекристаллизованной структуры. Поверхность образцов становится шероховатой и разрушение происходит по сетке рекристаллизованных зерен.

Таким образом, полосы сдвига или сетка рекристаллизованных зерен по бывшим полосам сдвига являются нежелательными элементами структуры в листах алюминиевых сплавов. Они снижают эксплуатационные и технологические свойства листов, могут ухудшить их товарный вид. Для исключения или сведения к минимуму вероятности появления полос сдвига применяют прокатку в отожженном состоянии и регламентацию деформации между отжигами.

Сплав 1460 сваривается аргонодуговой, электронно-лучевой и контактно-стыковой сваркой [1]. Для сварки плавлением применяется специальная сварочная проволока марки 1217 ($Al + 10\% Cu + Sc, Zr, Ti$). Использование сварочной проволоки, значительно отличающейся по химическому составу от

Таблица 4. Основные паспортные характеристики полуфабрикатов из сплава 1460

Вид полуфабриката	T, °C	E, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %
Листы г/к, 6 мм	20	80000	540	470	7.5
	-253	83000	760	560	12.0
Плиты, 20 мм	20	—	570	490	8.0
	-253	—	800	570	14.0
Поковка, раскатное кольцо	20	—	490	390	9.0
	-253	—	700	480	16.0
Профили прессованные	20	—	620	530	8.0
	-253	—	860	620	15.0

основного материала, позволило уменьшить склонность к образованию трещин в шве, повысить прочность и пластичность сварного соединения. Сварку сплава 1460 целесообразно проводить после полной термической обработки, а дополнительное увеличение прочности шва можно достичь за счет старения после сварки. При этом уменьшается ширина зоны термического влияния.

Сплав 1460 хорошо сваривается со сплавом 1201, обеспечивая возможность совместного использования обоих сплавов в конструкции. Необходимость такого сочетания явилось еще одной причиной отсутствия магния в сплаве, так как известно его вредное влияние на свариваемость сплава 1201. В табл. 3 приведены свойства сварных соединений листов.

Из приведенных данных видно, что свойства сварных соединений увеличиваются при криогенных температурах. При аргонодуговой сварке прочность сварного соединения $\sigma_{всв} = (0.5-0.6)\sigma_B$, при электронно-лучевой сварке $\sigma_{всв} = (0.6-0.7)\sigma_B$. Получение равнопрочности основного металла и сварного соединения может достигаться за счет усиления зоны сварки или дополнительной нагартовки. Возможно проведение сварки сплава в горячедеформированном состоянии или после закалки с проведением повторной термоупрочняющей обработки. При этом увеличивается прочность сварного соединения, но уменьшается пластичность.

Сплав 1460 по сравнению со сплавом 1201 имеет плотность на 9 % ниже, модуль упругости на 10 % выше, прочностные свойства и усталостная долговечность у сплава 1460 выше на 20—30 % на всем интервале рабочих температур. По характеристикам пластичности, трещиностойкости с коррозион-

ной стойкости эти сплавы практически равнозначны. При замене сплава 1201 на 1460 и только за счет удельной прочности можно снизить массу конструкции на 20—25 %.

При определении области применения Al-Li сплавов необходимо учитывать данные об устойчивости твердого раствора и прокаливаемости. Наиболее распространенной ошибкой является применение сплава с низкой устойчивостью твердого раствора для изготовления толстостенных полуфабрикатов, например штамповок сложной формы. В этом случае на поверхности массивных элементов появляются «темные пятна», а в центральной части — зоны неполной закалки, снижающие характеристики статической и циклической трещиностойкости.

1. Дриц А. М., Крымова Т. В. Российский высокопрочный свариваемый алюминий-литиевый сплав марки 1460 // Цветные металлы.—1996.—3.—С. 68—73.
2. Гринберг Н. М., Алексеенко Е. Н., Яковенко Л. Ф., Фридляндер И. Н. и др. Влияние криогенных температур и высокого вакуума на циклическую прочность плит алюминий-литиевого сплава 1460 // Проблемы прочности.—1993.—2.—С. 3—11.
3. Захаров В. В., Ростова Т. Д. Полосы сдвига в алюминиевых сплавах // Митом.—1996.—4.—С. 18—21.

PROPERTIES AND STRUCTURE OF HIGH-STRENGTH WELDING ALUMINIUM-LITHIUM ALLOY 1460

A. L. Lymarenko, V. G. Sitalo, T. N. Lytyshco

Using aluminium-lithium alloy of mark 1460, having increased strength-to-weight ratio, satisfactory weldability and corrosion resistance in Yuzhnoye SDO products, may to reduce the weight of highly-loaded units (up to 20—25 %) and possibility to recover the payload mass.