

**СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ
АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ, СТРУКТУРА
И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА**

Л. И. Маркашова, д. т. н., О. С. Кушнарева, м. н. с.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

Общеизвестна все возрастающая к настоящему времени востребованность материалов с особыми свойствами, к которым относятся и сверхлегкие Al-Li сплавы, используемые в авиационной и аэрокосмической технике. Последние обладают достаточным уровнем удельной прочности, пластичности и трещиностойкости в сложных эксплуатационных условиях, а также технологичностью при криогенных температурах [1].

Однако, ряд важных свойств сложнолегированных алюминиево-литиевых сплавов (прочностные характеристики, вязкость разрушения, трещиностойкость, сопротивление циклическим нагрузкам) резко изменяются в процессе изготовления конструкций и при их эксплуатации, что в основном связывают с особыми структурно-фазовыми превращениями этих материалов в процессе различных технологических операций, в том числе под влиянием условий сварки [2]. Показательны в этом плане и изменения механических свойств подобного типа сплавов, обусловленных термообработкой, которые связывают не только с влиянием химического состава и основных структурных факторов, но и с изменением их фазового состава [3].

Поэтому, учитывая сложность структурно-фазового состояния отмеченных материалов и особенно - процессов фазообразования в различных условиях термо-деформационного воздействия, представляется актуальным выполнить оценки влияния различных конкретных структурно-фазовых составляющих на изменение наиболее значимых для эксплуатационных условий механических характеристик сварных соединений, а именно - показателей прочности и вязкости. Представляют также интерес исследования влияния структурных и фазовых составляющих сварных соединений на протекание процессов накопления внутренних напряжений, возможности их пластической релаксации, что и является показателем трещиностойкости деформируемого материала, особенно в сложных аэродинамических условиях.

Базовая экспериментальная информация о структурно-фазовом состоянии металла шва сварного соединения алюминиевого сплава 1460 (Al-3%Cu-2%Li-0.08%Sc) с присадками Св1201 (Al-6,5%Cu-0,25%Zr-0,3%Mn) при легировании скандием (0,5%) и без такого легирования была получена при исследовании на следующих этапах: **1** - непосредственно после сварки – аргонодуговой (АДС); **2** - последующих после сварки термообработок: искусственное старение - $T=150^{\circ}\text{C}$, $t=22\text{ч.}$ и отжиг - $T=350^{\circ}\text{C}$, $t=1\text{ч.}$; **3** - внешнего динамического нагружения. Для комплексных исследований на различных структурных уровнях использовали оптическую, аналитическую растровую микроскопию

(СЭМ-515, фирмы PHILIPS, Голландия), а также микродифракционную просвечивающую электронную микроскопию (JEM-200CX, фирма JEOL, Япония) с ускоряющим напряжением 200kV.

Результаты исследований фазовых превращений в металле шва непосредственно после сварки и после применения последующих термообработок изложены в работах [4-6], где представлены данные об изменении структурно-фазового состава сплавов в зависимости от легирования скандием.

Экспериментальные результаты, полученные на различных структурных уровнях – от макро (зеренного) до микро (дислокационного), позволили выполнить аналитические оценки для определения дифференцированного вклада различных структурно – фазовых параметров в изменение интегральной (суммарной) величины механических характеристик – прочности, пластичности и трещиностойкости.

При этом оценка суммарного значения приращения предела текучести ($\Sigma\sigma_T$) для металла шва исследуемого сплава (без скандия и со скандием) с учетом химического состава (твердорастворное упрочнение - $\Delta\sigma_{тв.р}$), реальной плотности дислокаций (дислокационное упрочнение - $\Delta\sigma_d$), а также зеренного ($\Delta\sigma_z$), субзеренного упрочнения ($\Delta\sigma_c$), частиц фазовых выделений ($\Delta\sigma_ч$) и т.д. выполнялась по аналитическим зависимостям Холла-Петча, Орована и др. [7].

В результате оценок показано, что интегральное значение прочности ($\Sigma\sigma_T$) металла шва и конкретный вклад ($\Delta\sigma_T$) различных структурных факторов изменяется в зависимости и от технологических режимов (сварка, термообработки) и от легирования. Так, для металла шва наблюдается возрастание при легировании скандием прочностных характеристик (σ_T) примерно на 20МПа (10%) непосредственно после сварки и на 85МПа (26%) после термообработки $T=350^\circ\text{C}$, $t=1\text{ч}$, рис. 1. При этом, наибольший вклад в упрочнение вносят фазовые образования (~40%), а минимальный – дислокационная плотность (до ~10%). Информация о вкладе в упрочнение других структурных факторов для исследуемых составов металла шва при рассмотренных режимах приведена на рисунке 1.

А оценки влияния структурных факторов на изменение параметров вязкости разрушения (K_{1C}) металла шва с различным типом легирования иллюстрирует диаграмма, рис.2. При этом K_{1C} определяли по зависимости Краффта [8], включающей экспериментальные данные фрактографического анализа изломов с учетом размера фасеток (или ямок на поверхности разрушения). Анализ полученных результатов показал, что если непосредственно после сварки в металле шва для исследуемых случаев легирования (без Sc и со Sc) параметр вязкости разрушения K_{1C} практически не меняется при повышении уровня σ_T и составляет $\sim 35...36\text{МПа}\times\text{м}^{1/2}$ (рис.2), то при термообработке ($T=350^\circ\text{C}$, 1час) характер легирования оказывает влияние на изменение K_{1C} : без легирования скандием наблюдается снижение параметра вязкости разрушения на ~20%, а при легировании скандием, хотя и наблюдается еще большее повышение прочностных характеристик, однако параметр вязкости разруше-

ния K_{IC} практически не меняется, что свидетельствует о более оптимальном сочетании прочностных и пластических характеристик металла шва (рис. 1, 2).

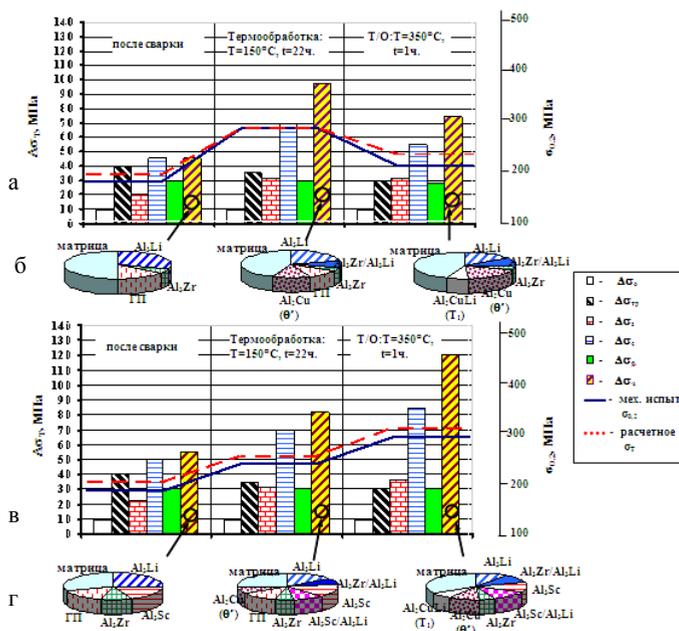


Рис. 1. Гистограммы (а, в) отражающие дифференцированный вклад отдельных структурных параметров ($\Delta\sigma_T$) в общее (интегральное) изменение предела текучести ($\Sigma\sigma_T$) металла шва алюминий-литиевого сплава 1460 с использованием присадочной проволоки Sв1201 (а) и Sв1201+0,5%Sc (в); б, г – секторные диаграммы отражающие объемные доли фаз, формирующихся при исследуемых режимах.

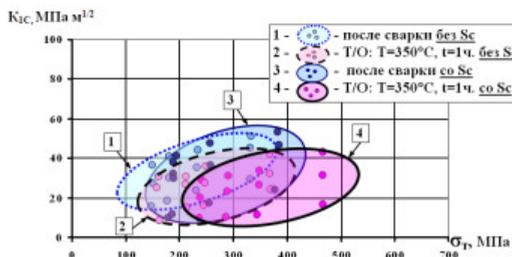


Рис. 2. Изменение прочностных характеристик ($\Sigma\sigma_T$) и вязкости разрушения (K_{IC}) металла шва сварного соединения сплава 1460 при легировании и без легирования скандием в условиях: после сварки и термообработки $T=350^\circ\text{C}$, $t=1\text{ч}$.

И, наконец, относительно такой весьма значимой механической характеристики сварных соединений, как трещиностойкость. В этом плане показателен характер изменения тонкой структуры исследуемого материала в условиях внешних динамических нагрузжений. Так, исследованиями на просвет показано, что в металле шва без скандия после термообработки ($T=350^{\circ}\text{C}$, $t=1\text{ч.}$) и последующего динамического нагружения происходит неравномерное распределение и четкая локализация деформации, а деформируемый металл приобретает неустойчивое структурное состояние, что проявляется в лавинообразном безбарьерном течении металла, о чем свидетельствуют мощные системы скольжения и полосы сдвига (ПС), (рис.3а). При этом наблюдается значительная неравномерность в распределении плотности дислокаций (ρ) вдоль полос сдвига, где $\rho\sim 10^8\dots 2\times 10^9\text{см}^{-2}$ (область внутри ПС) и $\rho\sim 8\times 10^{10}\dots 2\times 10^{11}$ (непосредственно вдоль полосовых границ), что приводит к формированию резких градиентов по величине локальных внутренних напряжений ($\Delta\tau_{л/вн}$). В результате выполненных оценок $\tau_{л/вн}$ с учетом плотности дислокаций [9] показано, что полосовые границы представляют собой протяженные локальные концентраторы внутренних напряжений, где $\tau_{л/вн}$ составляет $\sim 600\dots 1500\text{МПа}$ ($G/4,5\times 10\dots G/1,8\times 10$). В противоположность этому во внутренних объемах ПС значения $\tau_{л/вн}$ резко снижаются (практически на 2 порядка) до величины $\sim 5\dots 15\text{МПа}$, рис.4а. В итоге в металле шва без Sc в условиях динамического нагружения вдоль полос сдвига формируется резкий протяженный градиент ($\Delta\tau_{л/вн}$) локальных внутренних напряжений, являющихся причиной трещинообразования, а значит и снижения свойств не только прочности, но и пластичности соединений.

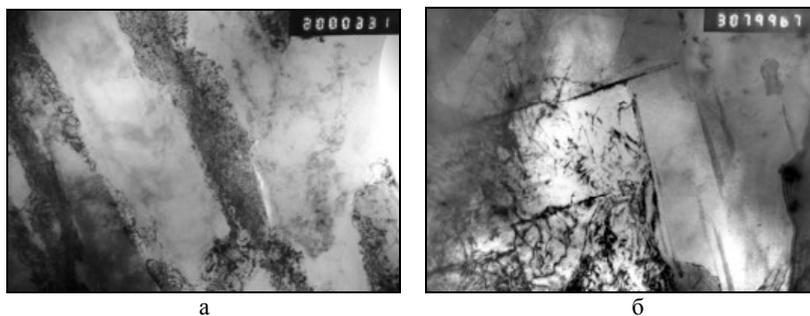


Рис. 3. Тонкая структура термообработанного ($T=350^{\circ}\text{C}$, $t=1\text{ч.}$) металла шва алюминиевого сплава 1460 в условиях динамического нагружения в зависимости от легирования: а - без Sc ($\times 20000$) и б - со Sc ($\times 30000$).

В случае же легирования скандием в металле шва при аналогичных условиях динамического нагружения формируется другой тип структуры, для которой характерно более равномерное распределение дислокаций, а также общее измельчение (фрагментация) структуры, рис.3б. При этом наблюдается устойчивое блокирование возникающих мощных систем скольжения фазовыми выделениями особого типа (со скандийсодержащими составляющими).

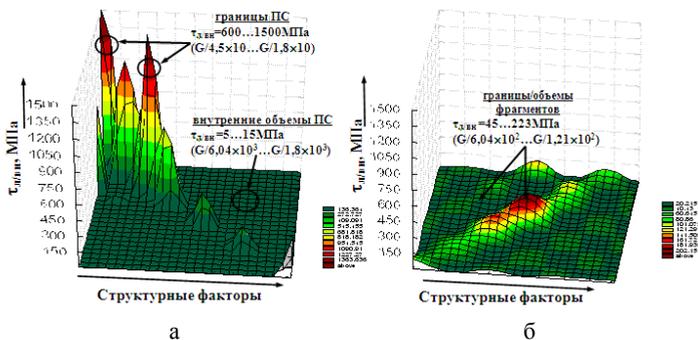


Рис. 4. Распределение локальных внутренних напряжений ($\tau_{д/вн}$) в различно легированном (Св1201 – а, Св1201+0,5%Sc – б) металле шва (термообработка - $T=350^{\circ}\text{C}$, $t=1\text{ч}$) после внешнего динамического нагружения.

Именно скандийсодержащие фазы (изменение их фазового состава представлено на рис.5) способствуют фрагментации структуры и соответственно, более равномерному распределению внутренних напряжений в металле шва, рис.4б. Формирование структур подобного типа способствует также увеличению возможностей пластической релаксации за счет подключения дополнительных - ротационных механизмов, что и подтверждается вязким характером разрушения соединений.

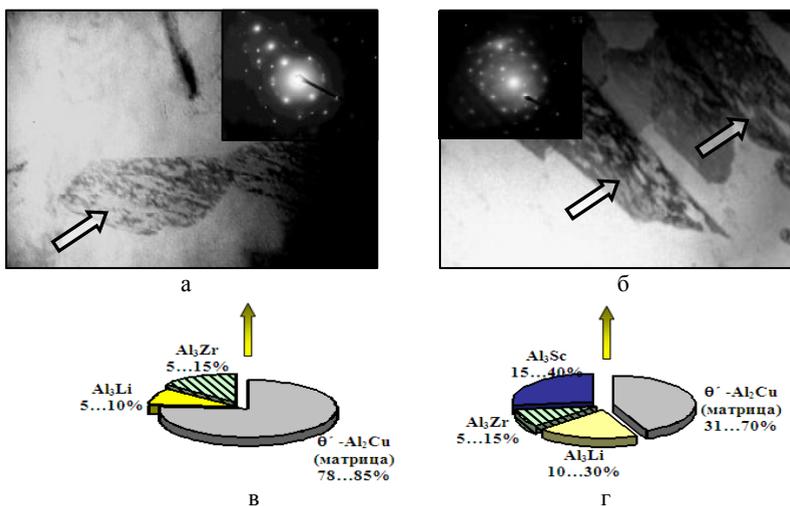


Рис. 5. Изменение (в условиях термообработки - $T=350^{\circ}\text{C}$, $t=1\text{ч}$) структуры (а, б) и состава (в, г) Al_2Cu (θ') – фаз в зависимости от легирования – без скандия (а, в) и со скандием (б, г) металла шва сварного соединения алюминий-литиевого сплава.

Таким образом, показано, что легирование скандием при всех исследуемых режимах сварки и особенно - термообработки приводит: к существенному диспергированию зеренной структуры, увеличению плотности дислокаций, активации процессов формирования субструктур и фазообразования во внутренних объемах зерен. Аналитическими оценками конкретного (дифференцированного) вклада различных структурно-фазовых параметров в изменение свойств прочности ($\Delta\sigma_T$), пластичности (K_{1C}) и трещиностойкости исследуемых сварных соединений показано, что легирование скандием способствует повышению общего (интегрального) значения предела текучести ($\Sigma\sigma_T$) металла и после сварки и последующих термообработок. Наибольший вклад в упрочнение ($\Delta\sigma_T$) вносят фазовые образования, а минимальный – дислокационная плотность. При этом легирование скандием приводит к более равномерному распределению нарастающих локальных внутренних напряжений и фрагментации формирующихся в металле шва в условиях динамических нагружений, мощных полос сдвига, что способствует трещиностойкости сварного соединения и, соответственно, повышению релаксационной способности металла шва за счет подключения к дислокационным - дополнительным (ротационным) механизмов пластической релаксации. Целесообразно и практически полезно проводить анализ взаимосвязи **структура ↔ свойства**, что позволяет корректировать свойства с целью создания в зоне соединения структур, оптимальных с точки зрения эксплуатационных свойств.

Использованная литература

1. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства / Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л. и др. – К.: Наук.думка, 1992. - 192с.
2. Production of ultrafine-grained metallic materials using an intense plastic straining technique / M. Furukawa, P. Berbon, Z. Horita et al. // Materials Science Forum. - 1997. - 233/234. - P.177-184.
3. Fraction and phase spacing of fibrous intermetallic S-LiAl in hypoeutectic Al-Li alloys by unidirectional solidification / Gufnghi M. et al. // Металлофизика. Новейшие технол. –2000. - Т.22, №4. - С.58-61.
4. Влияние добавок скандия на структурно-фазовое состояние металла шва при сварке алюминиевых сплавов 1460 / Л.И. Маркашова, Г.М. Григоренко, А.Я. Ищенко, А.В. Лозовская, О.С. Кушнарева // Автомат. сварка. - 2006. - №1. - С.17-24.
5. Влияние добавок скандия на тонкую структуру металла шва соединений алюминиевого сплава 1460 / Л.И. Маркашова, Г.М. Григоренко, А.Я. Ищенко, А.В. Лозовская, О.С. Кушнарева // Автомат. сварка. – 2006. - №2. - С.22-28.
6. Влияние добавок скандия на структурно-фазовое состояние металла шва соединений алюминиевых сплавов после термообработки / Л.И. Маркашова, Г.М. Григоренко, А.В. Лозовская, О.С. Кушнарева, В.Е. Федорчук // Автомат. сварка. - 2006. - №6. - С.9-14.
7. Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бронфин Б.М. Металлофизика высокопрочных сплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 312с.
8. Романив О.Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей. М.: Металлургия, 1979. - 176с.
9. Stroh A.N. The formation of cracks as a result of plastic flow // Proc. of the Roy. Soc., Seria A. – 1954. - т.223. - С.404-415.