



СТОЙКОСТЬ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Zn–Mg–Cu ПРОТИВ ОБРАЗОВАНИЯ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН ПРИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ

Чл.-кор. НАН Украины **А. Я. ИЩЕНКО**, **В. Е. ФЕДОРЧУК**, инж., **А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ**, канд. техн. наук,
М. Р. ЯВОРСКАЯ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследована стойкость высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu против образования горячих трещин при аргонодуговой сварке в зависимости от суммарного количества и соотношения в них основных легирующих элементов (цинка, магния, меди), а также от наличия добавок скандия в основном и присадочном материалах. Показано, что повышение суммарного количества основных легирующих элементов в сплавах и введение 0,3 % Sc в металл шва позволяет существенно увеличить стойкость сварных соединений против образования горячих трещин.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка, высокопрочные алюминиевые сплавы, легирование, скандий, металл шва, горячеломкость

Среди широкой гаммы алюминиевых сплавов наиболее высокопрочные относятся к системе Al–Zn–Mg–Cu. Так, например, временное сопротивление σ_B серийного сплава В96ц составляет 650 МПа, а при изменении соотношения основных легирующих элементов (цинка, магния, меди) и их суммарного содержания может достигать 750 МПа [1], благодаря чему этот сплав широко применяют в качестве конструкционного материала в различных отраслях промышленности. Сплавы данной системы характеризуются хорошей технологичностью при изготовлении полуфабрикатов. Однако использовать их для изготовления сварных конструкций затруднительно ввиду повышенной склонности к образованию горячих трещин при сварке.

Проведенные работы по улучшению свариваемости сплавов тройной системы Al–Zn–Mg путем микролегирования добавками скандия [2–4] показали возможность существенного повышения

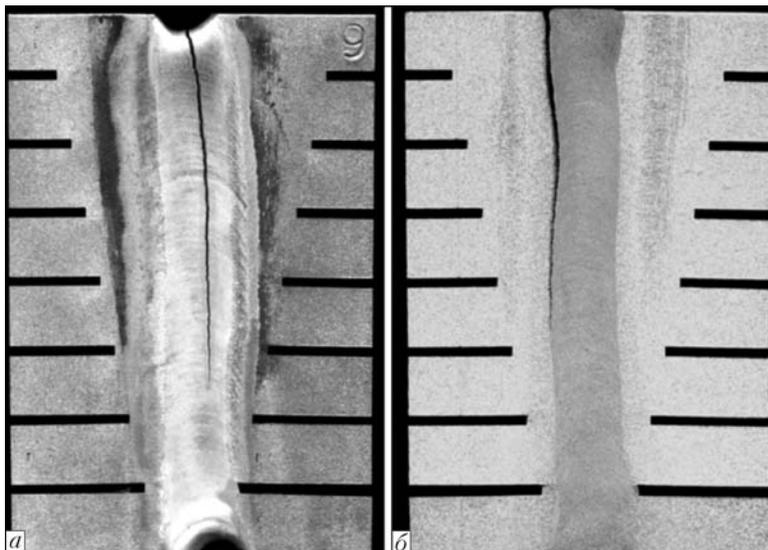
уровня прочности основного металла и металла сварных соединений и уменьшения их склонности к образованию горячих трещин при сварке. Что касается сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu, то мнения исследователей о целесообразности легирования скандием разделились. Некоторые из них [5] утверждают, что легирование скандием сплавов с высоким содержанием меди приводит к образованию комплексного соединения — W-фазы ($Al_xCu_ySc_z$), вследствие чего скандий не может участвовать в упрочнении твердого раствора и способствовать измельчению структуры сплава. Поэтому необходимы дальнейшие исследования для уточнения влияния скандия на свариваемость высоколегированных алюминиевых сплавов, содержащих медь.

В данной работе изложены результаты проведенных испытаний листов сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu толщиной 3 мм, химический состав которых приведен в табл. 1. Листы перед сваркой подвергали термической обработке. В зависимости от степени легирования сплавы без добавки скандия имели временное сопротивление разрыву от 510 до 655 МПа, а со скандием — 520...720 МПа. Автоматическую

Т а б л и ц а 1. Химический состав высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu

№ сплава	Химический элемент*, мас. %						$\Sigma(Zn+Mg+Cu)$, мас. %	σ_B , МПа
	Zn	Mg	Cu	Mn	Zr	Sc		
1	5,0	2,6	1,3	0,6	—	—	8,9	510
2	7,9	2,1	2,0	0,3	0,1	—	12,0	600
3	9,0	3,0	2,3	0,3	0,1	—	14,3	655
4	5,8	2,1	1,9	—	—	0,3	9,8	520
5	8,5	2,6	2,3	0,3	0,1	0,3	13,4	675
6	9,0	3,0	2,3	0,3	0,1	0,3	14,3	720

* Al — основа.



Характер растрескивания образцов пробы Хоулдрокфта из сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu после сварки без присадочной проволоки (а) и со скандием (б)

Таблица 2. Склонность сплавов к образованию горячих трещин при сварке без присадочной проволоки

№ сплава	$\Sigma(\text{Zn}+\text{Mg}+\text{Cu})$, мас. %	A, %*
1	8,9	64
2	12,0	60
3	14,3	50
4	9,8	52
5	13,4	46
6	14,3	38

* Здесь и далее приведены данные, полученные по результатам испытаний 5-7 образцов пробы Хоулдрокфта.

аргонодуговую сварку выполняли неплавящимся вольфрамовым электродом на следующем режиме: сварочный ток $I_{\text{св}} = 205 \dots 210$ А; скорость сварки $v_{\text{св}} = 14$ м/ч; скорость подачи проволоки $v_{\text{пр}} = 115$ м/ч. Склонность сплавов к образованию горячих трещин оценивали при сварке образцов пробы Хоулдрокфта [6].

На рисунке представлен типичный вид трещин, возникающих при аргонодуговой сварке. При сварке без присадочной проволоки горячие тре-

Таблица 3. Склонность сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu к образованию горячих трещин при сварке с различными присадочными проволоками

№ сплава	$\Sigma(\text{Zn}+\text{Mg}+\text{Cu})$, мас. %	Состав присадочной проволоки	Содержание скандия в шве, мас. %	A, %
1	8,9	Al-6,2Mg-0,2Zr	—	66
		Al-6,2Mg-0,2Zr-0,5Sc	0,17	64
2	12,0	Al-6,2Mg-0,2Zr	—	60
		Al-6,2Mg-0,2Zr-0,5Sc	0,17	59
3	14,3	Al-6,2Mg-0,2Zr	—	51
		Al-6,2Mg-0,2Zr-0,5Sc	0,17	49

щины образуются преимущественно в центральной части швов. Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что при сварке без присадочной проволоки длина горячих трещин зависит от суммарного количества основных легирующих элементов в сплаве. В образцах сплавов без скандия при повышении суммарного содержания цинка, меди и магния от 8,9 до 14,3 % длина трещин уменьшается от 64 до 50 %. В сплавах, модифицированных скандием, наблюдается такая же тенденция. При повышении суммарного содержания основных легирующих элементов от 9,8 до 14,3 мас. % показатель горячеломкости A металла швов снижается с 52 до 38 %. С повышением суммарного содержания основных легирующих элементов влияние скандия усиливается.

С учетом необходимости дальнейшего снижения показателя горячеломкости и повышения механических свойств сварных соединений проведены испытания на эффективность использования различных присадок. У сплавов без добавки скандия значения A оставались на прежнем уровне (табл. 3). Это связано с тем, что использование присадочной проволоки приводит к перемещению трещины из центральной части шва в зону сплавления (рисунки), где имеются скопления более легкоплавких эвтектических фаз в виде межзеренных прослоек. Скандий, присутствующий в присадочной проволоке, оказывает модифицирующее действие только на металл шва. В зоне сплавления шва с основным металлом его влияние оказывается недостаточным ввиду малой концентрации, в результате значения показателя горячеломкости уменьшаются незначительно (на 1...2 %).

Одновременное введение скандия в свариваемый металл и присадочную проволоку (табл. 4) позволяет обеспечить в металле шва содержание этого элемента на уровне 0,33...0,37 мас. %. При этом повышается его стойкость против образования горячих трещин при сварке. Определено, что повышение суммарного содержания основных легирующих элементов в сплавах от 9,8 до 14,3 мас. % приводит к уменьшению значений показателя горячеломкости с 46 до 29 %. Сравнение сплавов состава № 3 и 6 (табл. 1) показало, что введение 0,3 % Sc в основной металл позволяет уменьшить длину горячих трещин почти в 2 раза (табл. 3, сплав № 3; табл. 5, сплав № 6). На основании результатов металлографических исследований можно сделать вывод, что скандий оказывает влияние на процесс кристаллизации металла шва. В частности,



Таблица 4. Склонность сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu–Sc к образованию горячих трещин при сварке с присадочной проволокой Al–6,2Mg–0,2Zr–0,5Sc

№ сплава	Σ (Zn+Mg+Cu), мас. %	Содержание скандия в шве, мас. %	A, %
4	9,8	0,33	46
5	13,4	0,37	40
6	14,3	0,37	29

Таблица 5. Склонность сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu к образованию горячих трещин при сварке с присадочной проволокой различного состава

№ сплава	Σ (Zn+Mg+Cu), мас. %	Состав присадочной проволоки	A, %
1	8,9	Al–6,2Mg–0,2Zr	66
		Al–8,6Mg–0,1Zr	49
6	14,3	Al–6,2Mg–0,2Zr–0,5Sc	29
		Al–10,0Mg–0,5Sc	15

сплошные легкоплавкие эвтектики по границам кристаллитов становятся прерывистыми, что приводит к повышению сопротивления металла шва образованию трещин при затвердевании.

Проведены также исследования влияния содержания магния в присадочной проволоке на склонность к образованию горячих трещин при сварке. Из данных, представленных в табл. 5, видно, что у сплава одного и того же состава с увеличением уровня легирования присадочной проволоки, показатель горячеломкости сварных соединений уменьшается.

Проведенные исследования подтвердили целесообразность использования скандия в качестве модифицирующей добавки к присадочной проволоке типа AMг6 и сплавам системы Al–Zn–Mg–Cu с

целью повышения их стойкости против образования горячих трещин при аргонодуговой сварке.

Выводы

1. Стойкость высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu против образования горячих трещин при аргонодуговой сварке без присадочной проволоки зависит от суммарного содержания основных легирующих элементов в сплавах: при повышении их от 8,9 до 14,3 % длина трещины уменьшается с 64 до 50 %.

2. Введение 0,3 % Sc в основной металл и использование присадочной проволоки, легированной 0,5 % Sc, снижает показатель горячеломкости сварных соединений на 20...35 % по сравнению со сплавами без добавки скандия.

3. Повышение суммарного содержания легирующих элементов в основном металле до 14,3 мас. % и в присадочной проволоке до 10 мас. %, а также наличие в них скандия позволяют снизить склонность сплава к образованию горячих трещин до 15 %.

1. Фридляндер И. Н. Высокопрочные алюминиевые сплавы с цинком, магнием и медью // *Металловедение и терм. обработка мет.* — 2003. — № 9. — С. 11–13.
2. Влияние содержания скандия на структуру и показатели сверхпластичности алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–Sc–Zr / Г. М. Хан, А. О. Никифоров, В. В. Захаров, И. И. Новиков // *Цветн. металлы.* — 1993. — № 11. — С. 55–58.
3. О легировании алюминиевых сплавов добавками скандия и циркония / В. Г. Давыдов, В. И. Елагин, В. В. Захаров, Т. Д. Ростова // Там же. — 1996. — № 8. — С. 25–30.
4. Ищенко А. Я. Алюминиевые высокопрочные сплавы для сварных конструкций // *Прогресивні матеріали і технології.* — К.: Академперіодика, 2003. — Т.1. — С. 50–82.
5. Захаров В. В., Ростова Т. Д. Легирование скандием алюминиевых медьсодержащих сплавов // *Металловедение и терм. обработка мет.* — 1995. — № 2. — С. 23–27.
6. Рабкин Д. М. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов.* — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.

Resistance of Al–Zn–Mg–Cu system high-strength alloys to high-temperature cracking in argon-arc welding was studied, depending on the total amount and ratio of base alloying elements (zinc, magnesium, copper) in it, and also on the presence of scandium additions in base and filler materials. It is shown that increase of the total amount of base alloying elements in the alloys and addition of 0.3 % Sc to the weld metal allow considerably increasing the hot cracking resistance of welded joints.

Поступила в редакцию 03.11.2005