

## ВЛИЯНИЕ СКАНДИЯ НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Zn–Mg–Cu И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В.Е. Федорчук<sup>1</sup>, А.Г. Покляцкий<sup>1</sup>, Ю.В. Фальченко<sup>1</sup>, Г.П. Кислая<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>НТТУ «КПИ им. Игоря Сикорского», 03056, г. Киев, просп. Победы, 37

Исследовано влияние добавок скандия на структуру и механические свойства литого металла, листовых полуфабрикатов и стыковых соединений, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом алюминиевых сплавов системы легирования Al–Zn–Mg–Cu. Показано, что в скандийсодержащих сплавах как в литом металле, так и в их листовых полуфабрикатах, все структурные составляющие имеют меньшие размеры, чем в сплавах без скандия, что обеспечивает предел прочности листов на уровне 640...700 МПа в зависимости от содержания в них основных легирующих элементов. Установлено, что при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом листов толщиной 3 мм из сплавов со скандием, суммарная протяженность зоны разупрочнения сокращается на 20 % при одновременном повышении твердости металла шва, что обеспечивает более высокие механические свойства таких соединений. При комплексном введении скандия одновременно в основной материал и присадочную проволоку, что обеспечивает его содержание в шве на уровне 0,30...0,35 %, удастся значительно повысить стойкость сварных соединений сплавов системы легирования Al–Zn–Mg–Cu против образования кристаллизационных горячих трещин. Библиогр. 16, табл. 3, рис. 4.

*Ключевые слова:* алюминиевые сплавы, система легирования Al–Zn–Mg–Cu, скандий, микроструктура, механические свойства, горячие трещины

В последние годы интенсивно исследуется эффективность применения скандия в виде модификатора для алюминиевых сплавов различных систем легирования. Основным фактором, объясняющим уникальное влияние скандия на их структуру и свойства, является размерно-структурное сходство кристаллических решеток алюминия (4,405 Å) и интерметаллидной фазы Al<sub>3</sub>Sc (4,407 Å), благодаря чему частицы последней выступают эффективными зародышами центров кристаллизации в слитках и сварных швах [1–3]. В результате происходит измельчение структуры кристаллизующегося металла, что положительно влияет на его физико-механические свойства [4]. Так, в деформируемых алюминиевых сплавах на основе системы легирования Al–Mg, не упрочняемых термической обработкой, благодаря добавкам скандия обеспечиваются более высокие показатели предела прочности и предела текучести как листовых полуфабрикатов, так и их сварных соединений, а также повышается их стойкость против образования кристаллизационных трещин при сварке плавлением [5–7].

Положительное влияние оказывает введение скандия и в термически упрочняемые алюминиевые сплавы системы легирования Al–Mg–Li. При этом кроме повышения предела прочности их сварных соединений создаются предпосылки для дополнительного упрочнения металла швов за счет их термической обработки благодаря выде-

лению вторичных дисперсных алюминий-скандиевых фаз и упрочняющих частиц основных легирующих элементов [8–10]. По-разному могут проявляться добавки скандия в алюминиевых сплавах, содержащих в качестве легирующих элементов медь. Так, для сплавов 1201 и 1460 предел прочности швов, полученных дуговой сваркой, выше при использовании сварочной проволоки типа Св1201, содержащей 0,5 % Sc [11]. В то же время, при сварке медьсодержащих алюминиевых сплавов медь со скандием могут образовывать химическое соединение (W-фазу) [12]. В случае их взаимодействия добавки скандия не будут участвовать в упрочнении сплава и обеспечивать измельчение его структуры. А увеличение объемной доли избыточных фаз приведет к снижению прочности, пластичности и вязкости разрушения металла швов. Подтверждением этого могут быть результаты, полученные при испытании сплава Д16 (Al–Cu–Mg), дополнительно содержащего 0,4 % Sc [13]. Что касается высокопрочных сложнелегированных алюминиевых сплавов системы легирования Al–Zn–Mg–Cu, то полученные при исследовании некоторых сплавов результаты свидетельствуют о том, что добавки скандия также могут оказать положительное влияние на их физико-механические характеристики [14, 15].

Цель исследований заключалась в изучении влияния добавок Sc на структуру и механические свойства литого металла, листовых полуфабри-

катов и стыковых соединений, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, алюминиевых сплавов системы легирования Al–Zn–Mg–Cu, а также стойкость их к образованию кристаллизационных трещин.

**Методика проведения исследований.** Для проведения исследований были изготовлены четыре опытных сплава системы легирования Al–Zn–Mg–Cu с различным содержанием Zn, Mg и Sc (табл. 1). При получении листов толщиной 3 мм из слитка диаметром 150 мм был использован комбинированный способ обработки давлением. Методом горячего прессования из слитка были получены экструдированные заготовки сечением 10×100 мм, которые в последующем подвергались горячей и холодной прокатке до толщины 3 мм. Поскольку в результате прокатки листов степень их нагартовки может отличаться, то структурные особенности и механические свойства полученных сплавов исследовали как на образцах, вырезанных из литых заготовок в исходном состоянии (естественное старение на протяжении 30 сут), после отжига (310 °С на протяжении 1 ч) и после закалки (при 465 °С) с последующим искусственным старением (при 120 °С на протяжении 16 ч), так и на образцах, вырезанных из готовых листов толщиной 3 мм.

Автоматизированную аргонодуговую сварку неплавящимся электродом (АДСНЭ) полученных листов осуществляли переменным током с прямоугольной формой волны от источника питания MW-450 («Fronius», Австрия) с помощью сварочной головки АСТВ-2М. Скорость сварки составляла 14 м/ч, величина сварочного тока — 300 А, скорость подачи присадочной проволоки диаметром 1,6 мм — 96 м/ч. При сварке сплавов без скандия применяли серийную сварочную проволоку СвАМг63 (Al–6,3Mg–0,5Mn–0,2Zr) и опытную сварочную проволоку СвАМг63Sc такого же химического состава, но дополнительно содержащую 0,5 % Sc, а при сварке скандийсодержащих сплавов — только опытную сварочную проволоку СвАМг63Sc. Перед сваркой проводили химическое травление листовых заготовок по общепринятой технологии, а затем механическую зачистку торцов и поверхностей кромок на глубину около 0,1 мм во избежание образования дефектов в виде пор и макровключений оксидной пленки. Для оценки склонности сварных соединений к образо-

ванию горячих кристаллизационных трещин использовали стандартную методику с применением образцов Хоулдрокфта в двух вариантах: сварка без присадочной проволоки и сварка с использованием присадочной проволоки. Аргонодуговую сварку неплавящимся электродом таких образцов также осуществляли на упомянутом выше оборудовании со скоростью 12 м/ч. Величина сварочного тока составляла 235 А, скорость подачи присадочной проволоки диаметром 1,6 мм — 92 м/ч.

Твердость металла измеряли на поперечных макрошлифах полученных сварных соединений. Степень разупрочнения металла в зоне сварки оценивали на приборе Rockwell при нагрузке  $P = 600$  Н. Предел прочности сварных соединений  $\sigma_{\text{в}}^{\text{с.с}}$  определяли при статическом растяжении на универсальном сервогидравлическом комплексе MTS 318.25 стандартных образцов с усилением шва и со снятым проплавом шва, а предел прочности металла шва  $\sigma_{\text{в}}^{\text{м.ш}}$  — на таких же образцах, но без усиления шва. Другие механические свойства основного материала и сварных соединений также выполнялись в соответствии со стандартом [16]. Оценку структурных особенностей исследуемых полуфабрикатов и их сварных соединений осуществляли с помощью оптического электронного микроскопа МИМ-8.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В результате проведенных исследований установлено, что введение Sc в алюминиевые сплавы системы легирования Al–Zn–Mg–Cu оказывает положительное влияние на структуру и механические свойства полуфабрикатов и их сварных соединений. Так, анализ микроструктуры литого металла показал, что в скандийсодержащих сплавах наблюдается заметное (в 3...5 раз) уменьшение размера зерен (рис. 1). В исходном состоянии после естественного старения, обусловленного последовательностью технологических операций изготовления слитков опытных сплавов и подготовкой исследуемых образцов, в металле сплавов без скандия образуется характерная литая структура с размером кристаллитов в пределах 120...240 мкм. Микроструктура слитков в исходном состоянии характеризуется наличием  $\alpha$ -твердого раствора, фаз  $\eta(\text{Mg}(\text{CuZn})_2)$ ,  $\text{T}(\text{ZnMgAlCu})$  и эвтектических выделений по границам кристаллов, содержащих Zn (24...26 %), Mg (7,7...8,6 %)

**Таблица 1.** Химический состав слитков и листов, изготовленных из опытных сплавов системы легирования Al–Zn–Mg–Cu

Номер сплава	Содержание элементов, мас. %				
	Zn	Mg	Cu	Zr	Sc
1	8,0...8,2	1,8...2,1	2,2...2,3	0,10...0,13	–
2	8,0...8,2	1,8...2,1	2,2...2,3	0,10...0,13	0,08...0,14
3	8,3...8,7	2,5...2,8	2,2...2,4	0,15...0,20	–
4	8,3...8,7	2,5...2,8	2,2...2,4	0,15...0,20	0,28...0,32

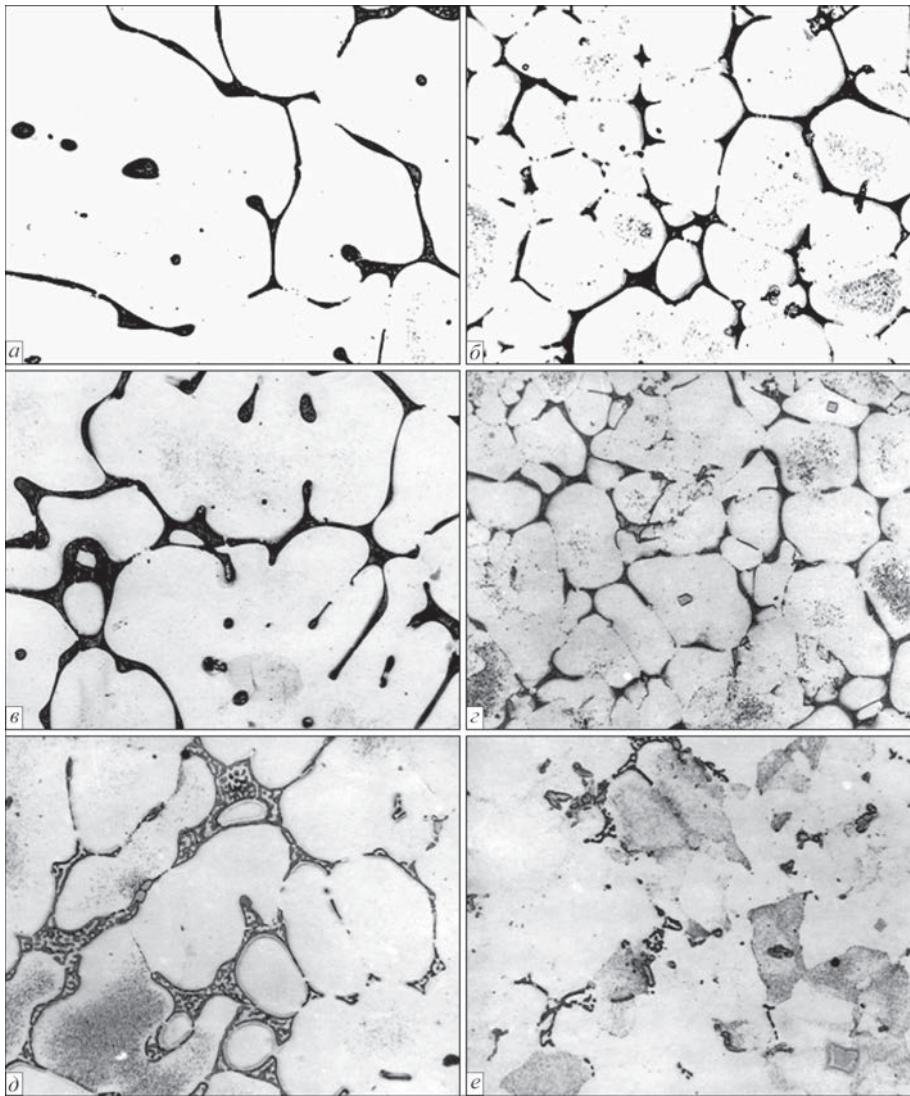


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 500$ ) литого металла алюминиевых сплавов 1 (*a, в, д*) и 2 (*б, з, е*) в исходном состоянии после естественного старения на протяжении 30 сут (*a, б*), после отжига при  $310\text{ }^{\circ}\text{C}$  на протяжении 1 ч (*в, з*) и после закалки при  $465\text{ }^{\circ}\text{C}$  и последующего искусственного старения при  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  на протяжении 16 ч (*д, е*)

Cu (13...15 %) и следы Zr (0,098 %). В эвтектических выделениях в сплавах со скандием также обнаруживаются следы скандия (0,028 %), а также присутствуют интерметаллиды  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$  размером 3...7 мкм (рис. 1, *a, б*). При этом в скандийсодержащих сплавах происходит формирование более мелких (30...50 мкм) кристаллитов благодаря наличию частиц первичной фазы  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ , выступающих эффективными зародышами центров кристаллизации металла.

В процессе изготовления для получения оптимальных механических свойств литых заготовок их подвергают технологическим операциям термической обработки, которые предусматривают проведение высокотемпературного нагрева под отжиг или закалку с последующим старением. Проведение таких термических операций для алюминиевых сплавов не приводит к существенному изменению их микроструктуры, за исключе-

нием появления дисперсных выделений вторичных фаз (рис. 1, *в-е*).

Такие структурные особенности сплавов, со скандием и без него, сказываются и на механических свойствах полученных литых заготовок. Об этом наглядно свидетельствуют результаты испытания образцов металла опытных сплавов 1 и 2 (табл. 2). После естественного старения литой металл сплава 2, содержащего скандий, имеет более высокие показатели предела прочности, условного предела текучести и удлинения, чем литой металл сплава 1 без скандия. После отжига образцов литого металла из этих сплавов происходит снижение их предела прочности. Но если в сплаве 1 без скандия при этом условный предел текучести литого металла снижается на 50 МПа, а относительное удлинение повышается с 2,3 до 3,3 %, то наличие скандия в сплаве 2 приводит к повышению условного предела текучести литого металла



**Таблица 2.** Механические свойства металла слитков опытных сплавов в исходном состоянии и после термической обработки

Номер сплава	Состояние	Механические свойства		
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
1	Естественное старение: 30 сут	326	219	2,3
	Отжиг: 310 °С, 1 ч	210	169	3,3
	Закалка: 465 °С + искусственное старение: 120 °С, 16 ч	455	-	-
2	Естественное старение: 30 сут	339	225	3,7
	Отжиг: 310 °С, 1 ч	251	250	2,3
	Закалка: 465 °С + искусственное старение: 120 °С, 16 ч	525	-	-

Примечание. Приведены средние значения по результатам испытания 5-7 образцов.

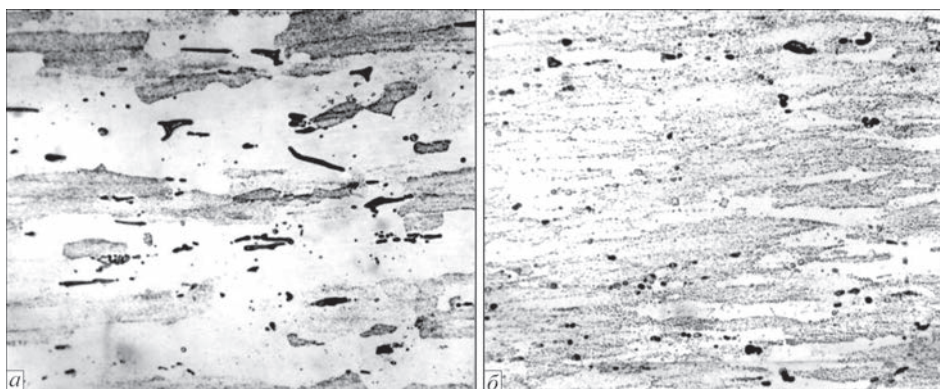


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 500$ ) листов толщиной 3 мм опытных сплавов 3 (а) и 4 (б) после закалки и искусственного старения на 25 МПа и снижению относительного удлинения с 3,7 до 2,3 %. Это связано с выделением вторичных интерметаллидов на основе алюминидов скандия, которые тормозят движение дислокаций. Закаленные и искусственно состаренные образцы литого металла имеют максимальный предел прочности.

Исследования листовых заготовок показали, что их микроструктура сформирована в результате протекания одновременно двух процессов: постепенного преобразования исходной литой структуры и образования новых элементов деформационного происхождения — текстуры проката (рис. 2). Микроструктура таких листов толщиной 3 мм характеризуется наличием вытянутых вдоль направления проката зерен твердого рас-

твора основных легирующих элементов в алюминии, вытянутых и раздробленных эвтектических выделений, а также большого количества мелких вторичных интерметаллидов, равномерно расположенных по сечению листов и ориентированных вдоль направления деформирования заготовок. При этом практически все составляющие микроструктуры листовых заготовок сплавов со скандием имеют меньшие размеры, чем те, в которых скандий отсутствует. Благодаря этому обеспечиваются и более высокие их механические свойства. Так, листы из сплава 1 имеют предел прочности на уровне 600 МПа, а листы из сплава 3 — на уровне 640 МПа, тогда как у соответствующих им скандийсодержащих сплавов 2 и 4 этот показатель составляет 630 и 700 МПа. При этом условный предел текучести листов из сплава 4 составляет 645 МПа, из сплава 2 — 580 МПа, из сплава 3 — 573 МПа, а из сплава 1 — 560 МПа. Хотя относительное удлинение у листов из скандийсодержащих сплавов 2 и 4 находится на уровне 6,3 и 5,0 %, соответственно, что почти в два раза ниже, чем у листов без скандия (10,0 %).

Положительное влияние скандия в сплавах, обусловленное измельчением зерна, сказывается и на сварных соединениях листов. Так, суммарная протяженность зоны разупрочнения при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом листов толщиной 3 мм из сплава 4, содержащего скандий, составляет около 35 мм, а из сплава 3, в котором скандий отсутствует — около 46 мм (рис. 3). При этом минимальная твердость металла шва в

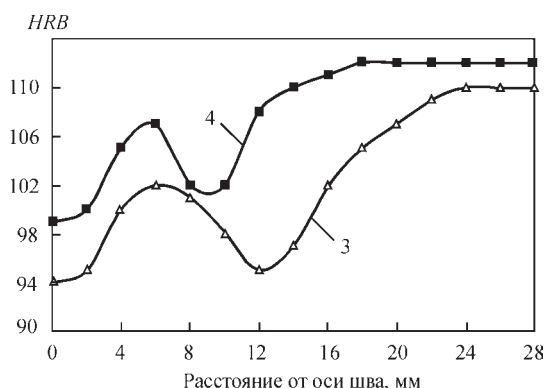


Рис. 3. Распределение твердости в сварных соединениях, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом листов толщиной 3 мм из опытных сплавов 3 и 4 с использованием сварочных присадочных проволок СвАМг63 и СвАМг63Sc, соответственно

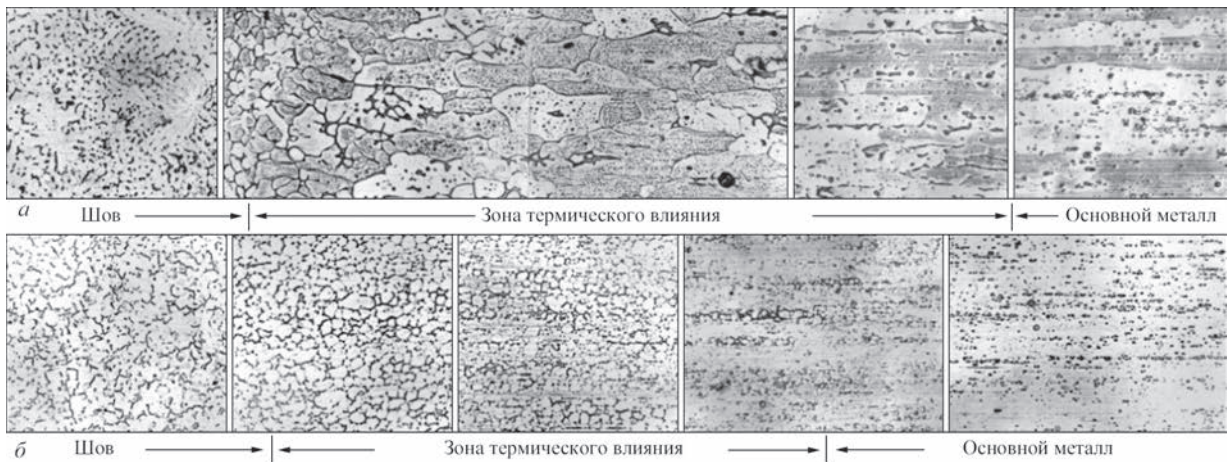


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 256$ ) сварных соединений, полученных при аргодуговой сварке неплавящимся электродом листов толщиной 3 мм из опытных сплавов 3 (а) и 4 (б) с использованием присадочных проволок СвАМг63 и СвАМг63S, соответственно

первом случае находится на уровне *HRB* 99, а во втором — всего *HRB* 94. Твердость основного металла в зоне сплавления его с металлом шва для сплава без скандия составляет *HRB* 100...102, а для сплава со скандием — *HRB* 105...107. В зоне отжига также наблюдаются различные уровни снижения твердости металла: *HRB* 95 у сплава без скандия и *HRB* 101 у сплава со скандием. Такие различия в характере распределения твердости металла в сварных соединениях сплавов со скандием и без него обусловлены их структурными особенностями (рис. 4). В металле шва, полученного при сварке скандийсодержащего сплава, формируются мелкие равноосные кристаллиты с тончайшими прослойками эвтектических выделений по границам зерен. Тогда как при сварке сплава без скандия в металле шва происходит образование более крупных дендритов и наблюдается большое скопление вторичных фаз в межзеренном пространстве, что свидетельствует о меньшей объемной доле границ зерен. Но еще более заметна разница в размерах структурных составляющих в зоне термического влияния, прилегающей к сварному шву. В сплаве 3, не содержащем скандия, в результате рекристаллизации зерен происходит формирование крупнодендринтой структуры металла с выделением по их границам утолщенных эвтектических прослоек. А наличие скандия в сплаве 4 позволяет практически предотвратить рекристаллизацию зерен в зоне термического влияния и получить мелкокристаллическую структуру металла.

Более высокие уровни твердости металла в характерных зонах сварных соединений сплавов со скандием, обусловленные формированием мелкокристаллической структуры металла в зоне формирования неразъемных соединений, могут свидетельствовать о повышении их прочностных

характеристик. Результаты механических испытаний образцов, приведенные в табл. 3, подтверждают эффективность применения скандия в исследуемых сплавах с целью повышения предела прочности их сварных соединений. Так, если этот показатель для сварных соединений опытных сплавов 1 и 3 без скандия находится на уровне 309 и 343 МПа, соответственно, то для сплавов 2 и 4 — на уровне 329 и 441 МПа при использовании в последнем случае присадочной проволоки СвАМг63Sc. При этом также наблюдается более высокое значение предела прочности металла швов и угла загиба  $\alpha$  сварных соединений. Но еще существеннее становится влияние скандия на повышение предела прочности сварных соединений и металла швов после термической обработки образцов, включающей закалку при 465 °С и последующее искусственное старение при 120 °С на протяжении 16 ч. При таком термическом воздействии в результате нагревания металла до температуры закалки происходит распад твердого раствора скандия в алюминии и выделение вторичных интерметаллидов  $Al_3Sc$ , оказывающих упрочняющее воздействие на металл шва. А искусственное старение образцов способствует распаду твердого раствора основных легирующих элементов. В результате предел прочности сварных соединений в сплавах 2 и 4, содержащих скандий, повышается до 572 и 660 МПа, соответственно, что на 68 и 52 МПа превышает этот показатель для сплавов 1 и 3 без скандия. При этом для предела прочности металла швов эта разница составляет 66 и 45 МПа, соответственно.

Особенности первичной кристаллизации металла шва и формирования структурной и химической неоднородностей в зоне образования неразъемного соединения во многом определяет стойкость высоколегированных многокомпонент-

**Таблица 3.** Механические свойства сварных соединений листов из опытных сплавов системы легирования

Номер сплава	$\Sigma$ (Zn+Mg+Cu), %	Присадочная проволока	Механические свойства после сварки		
			$\sigma_{\text{в}}^{\text{с.с.}}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}^{\text{м.ш.}}$ , МПа	$\alpha$ , град
1	12,3	СвАМг63	<u>314-305</u> 309	<u>336-329</u> 330	<u>22-21</u> 21
		СвАМг63Sc	<u>321-315</u> 319	<u>344-339</u> 341	<u>25-23</u> 24
2		СвАМг63Sc	<u>333-326</u> 329	<u>351-348</u> 347	<u>25-23</u> 24
3	13,4	СвАМг63	<u>349-340</u> 343	<u>408-399</u> 403	<u>22-21</u> 21
		СвАМг63Sc	<u>361-355</u> 357	<u>418-404</u> 411	<u>23-22</u> 22
4		СвАМг63Sc	<u>445-439</u> 441	<u>419-405</u> 412	<u>23-22</u> 22
Механические свойства после термообработки*					
1	12,3	СвАМг63	<u>512-500</u> 504	<u>540-529</u> 536	—
2		СвАМг63Sc	<u>579-568</u> 572	<u>608-600</u> 602	—
3	13,4	СвАМг63	<u>616-605</u> 608	<u>638-629</u> 633	—
4		СвАМг63Sc	<u>665-655</u> 660	<u>685-672</u> 678	—

*Примечания:* В числителе указаны максимальные и минимальные, а в знаменателе — средние значения показателей по результатам испытания 5...7 образцов. \*Предел прочности металла шва после термической обработки (закалка: 465 °С + искусственное старение: 120 °С, 16 ч) определяли на образцах с уменьшенным сечением в центральной части шва.

ных алюминиевых сплавов к образованию горячих кристаллизационных трещин при сварке. Они образуются и распространяются на завершающем этапе кристаллизации шва и имеют межкристаллитный характер. Поэтому получение мелкокристаллической структуры швов с большой объемной долей прерывистых границ зерен является одним из эффективных методов повышения стойкости сварных соединений к образованию таких дефектов. В результате проведенных исследований установлено, что при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом образцов Хоулдрокфта без присадочной проволоки распространение горячих кристаллизационных трещин происходит в центральной части швов. Наличие непрерывных протяженных эвтектических прослоек по границам зерен способствует образованию длинных трещин, практически независимо от типа структуры. Поэтому показатель горячеломкости  $A$ , отбрасывающий в процентном отношении длину трещины к общей длине образца Хоулдрокфта, по результатам сварки 6...8 таких образцов для сплавов 1 и 3 без скандия находится на уровне 59,0 и 53,7 %, а для скандийсодержащих сплавов 2 и 4 — на уровне 50,0 и 45,7 %.

При сварке образцов Хоулдрокфта с использованием присадочных проволок растрескивания металла в центральной части шва не происходит, поскольку горячие трещины образуются в зоне сплавления его с основным металлом, где в процессе кристаллизации расплавленного металла

находятся скопления легкоплавких эвтектических фаз в виде межзеренных прослоек. Поэтому применение скандийсодержащей присадочной проволоки при сварке сплавов без скандия не может оказать существенного влияния на протяженность таких дефектов. И лишь при одновременном введении скандия в основной материал и присадочную проволоку, обеспечивая его содержание в шве на уровне 0,30...0,35 %, удается значительно повысить стойкость сварных соединений сплавов системы легирования Al–Zn–Mg–Cu против образования горячих кристаллизационных трещин. Так, при сварке образцов Хоулдрокфта из сплава 2, содержащего 0,08...0,14 % Sc, с присадочной проволокой СвАМг63Sc, в состав которой входит 0,5 % Sc, показатель горячеломкости  $A$  снизился до 42,4 %, а при сварке таких образцов из сплава 4, содержащего 0,28...0,32 % Sc, с той же присадочной проволокой — до 39,8 %.

### Выводы

1. Введение 0,08...0,32 % Sc в алюминиевые сплавы системы легирования Al–Zn–Mg–Cu благодаря образованию частиц первичной фазы  $Al_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ , выступающих эффективными зародышами центров кристаллизации металла, обеспечивает формирование в слитках мелких (30...50 мкм) зерен, что в 3...5 раз меньше по сравнению с характерными структурными параметрами сплавов без скандия.

2. Достигнутое за счет добавок скандия измельчение структуры металла сохраняется после



термодеформационной обработки слитков и обеспечивает более высокие (на 15...20 %) механические свойства полученных полуфабрикатов, по сравнению с их безскандиевыми аналогами.

3. При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом листов толщиной 3 мм из скандийсодержащих сплавов сокращается суммарная протяженность зоны разупрочнения и снижается уровень разупрочнения металла в шве, на границе его сплавления с основным материалом и в зоне отжига, благодаря чему повышается предел прочности металла шва и сварного соединения в целом.

4. Одновременное введение скандия в основной материал и присадочную проволоку для обеспечения его содержания в шве на уровне 0,30...0,35 % позволяет снизить показатель горячеломкости соединений на 11...26 % в зависимости от суммарного содержания основных легирующих элементов в сплаве.

### Список литературы

1. Бондарев Б.И., Елагин В.И. (1992) Новые алюминиевые сплавы, легированные скандием. *Технология легких сплавов*, **5**, 22–28.
2. Давыдов В.Г., Елагин В.И., Захаров В.В., Ростова Т.Д. (1996) О легировании алюминиевых сплавов добавками скандия и циркония. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **8**, 25–30.
3. Ищенко А.Я. (2003) Алюминиевые высокопрочные сплавы для сварных конструкций. *Прогресивні матеріали і технології у 2 т*. Київ, Академперіодика, Т. 1, сс. 50–82.
4. Мильман Ю.В. (2003) Влияние скандия на структуру, механические свойства и сопротивление коррозии сплавов алюминия. *Там же*. Київ, Академперіодика, Т. 1, сс. 335–360.
5. Елагин В.И., Швечков Е.И., Филатов Ю.Л., Захаров В.В. (2005) Трещиностойкость листов из сплавов Al–Mg–Sc. *Технология легких сплавов*, **1** **4**, 40–44.
6. Ищенко А.Я., Лозовская А.В., Покляцкий А.Г. и др. (1999) Структура и свойства соединений, полученных при сварке сплава AlMg6 с использованием присадочных проволок со скандием. *Автоматическая сварка*, **4**, 19–25.
7. Рязанцев В.И., Филатов Ю.А. (2003) Технологические аспекты дуговой сварки алюминиевых сплавов со скандием. *Авиационная промышленность*, **1**, 13–17.
8. Туркина Н.И., Семенова Б.В. (1992) Структура и свойства сплавов системы Al–Mg–Li, легированных скандием. *Технология легких сплавов*, **1**, 57–59.
9. Ищенко А.Я., Лозовская А.В., Покляцкий А.Г. и др. (2002) Повышение прочности швов при дуговой сварке сплава 1420 с применением скандийсодержащих присадок. *Автоматическая сварка*, **1**, 11–15.
10. Братухин А.Г., Третьяк Н.Г., Склабинская И.Е. (1993) Структура и механические свойства сварных соединений алюминийлитиевых сплавов при сварке опытными присадками со скандием. *Там же*, **1**, 11–15.
11. Покляцкий А.Г., Лозовская А.В., Гринюк А.А. (2006) Повышение прочности швов при дуговой сварке алюминий-сво-медных сплавов с применением скандийсодержащих присадок. *Там же*, **2**, 29–32.
12. Захаров В.В., Ростова Т.Д. (1995) Легирование скандием алюминиевых медьсодержащих сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **2**, 23–27.
13. Елагин В.И., Захаров В.В., Ростова Т.Д., Филатов Ю.А. (1989) Некоторые металлургические принципы легирования, технологии производства и термической обработки алюминиевых сплавов, содержащих скандий. *Технология легких сплавов*, **9**, 27–34.
14. Fedorchuk, V.E. (2015) Special features of the formation of the microstructure and chemical heterogeneity in welded joints in alloys of the Al–Zn–Mg–Cu system alloyed with scandium. *Welding International*, **29**, **8**, 619–623. doi:10.1080/09507116.2014.960695.
15. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Новиков И.Н. и др. (1993) Сверхпластичность высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu, легированных скандием. *Технология легких сплавов*, **7** **8**, 43–47.
16. (1967) ГОСТ 6996-66. *Сварные соединения. Методы механических испытаний*. Москва, Изд-во стандартов.

### References

1. Bondarev, B.I., Elagin, V.I. (1992) New aluminium alloys, doped with scandium. *Tekhnologiya Lyogkikh Spлавov*, **5**, 22–28 [in Russian].
2. Davydov, V.G., Elagin, V.I., Zakharov, V.V., Rostova, T.D. (1996) On alloying of aluminium alloys with scandium and zirconium additives. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **8**, 25–30 [in Russian].
3. Ishchenko, A.Ya. (2003) Aluminium high-strength alloys for welded structures. *Progresywni Materialy i Tekhnologii*. Kiev, Akadempriodika, Vol. 1, 50–82 [in Russian].
4. Milman, Yu.V. (2003) Effect of scandium on structure, mechanical properties and corrosion resistance of aluminium alloys. *Progresywni Materialy i Tekhnologii*. Kiev, Akadempriodika, Vol. 1, 335–360 [in Russian].
5. Elagin, V.I., Shvechkov, E.I., Filatov, Yu.L., Zakharov, V.V. (2005) Corrosion resistance of sheets of Al–Mg–Sc alloys. *Tekhnologiya Lyogkikh Spлавov*, **1** **4**, 40–44 [in Russian].
6. Ishchenko, A.Ya., Lozovskaya, A.V., Poklyatsky, A.G. et al. (1999) Structure and properties of joints produced in welding of AlMg6 alloy using the filler wires with scandium. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 19–25 [in Russian].
7. Ryazantsev, V.I., Filatov, Yu.A. (2003) Technological aspects of arc welding of aluminium alloys with scandium. *Aviats. Promyshlennost*, **1**, 13–17 [in Russian].
8. Turkina, N.I., Semenova, B.V. (1992) Structure and properties of Al–Mg–Li system alloys doped with scandium. *Tekhnologiya Lyogkikh Spлавov*, **1**, 57–59 [in Russian].
9. Ishchenko, A.Ya., Lozovskaya, A.V., Poklyatsky, A.G. et al. (2002) Increase in strength of welds in arc welding of alloy 1420 using the Sc-containing fillers. *The Paton Welding J.*, **1**, 10–14.
10. Bratukhin, A.G., Tretyak, N.G., Sklabinskaya, I.E. (1993) Structure and mechanical properties of welded joints of aluminium-lithium alloys in welding by test additives with scandium. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 11–15 [in Russian].
11. Poklyatsky, A.G., Lozovskaya, A.V., Grinyuk, A.A. et al. (2006) Improvement of weld strength in arc welding of Al–Cu alloys with application of Sc-containing fillers. *The Paton Welding J.*, **2**, 26–29.
12. Zakharov, V.V., Rostova, T.D. (1995) Alloying with scandium of Cu-containing alloys. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **2**, 23–27 [in Russian].
13. Elagin, V.I., Zakharov, V.V., Rostova, T.D., Filatov, Yu.A. (1989) Some materials science principles of alloying, technology of manufacturing and heat treatment of Sc-containing aluminium alloys. *Tekhnologiya Lyogkikh Spлавov*, **9**, 27–34 [in Russian].
14. Fedorchuk, V.E. (2015) Special features of the formation of the microstructure and chemical heterogeneity in welded joints in alloys of the Al–Zn–Mg–Cu system alloyed with scandium. *Welding International*, **29**, **8**, 619–623. doi:10.1080/09507116.2014.960695.
15. Fridlyander, I.N., Senatorova, O.G., Novikov, I.N. et al. (1993) Superplasticity of high-strength Sc-doped alloys of Al–Zn–Mg–Cu system. *Tekhnologiya Lyogkikh Spлавov*, **7-8**, 43–47 [in Russian].
16. (1967) GOST 6996-66: *Welded joints. Methods of mechanical tests*. Moscow, Izd-vo Standartov [in Russian].

## ВПЛИВ СКАНДИЮ НА ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРУ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Al–Zn–Mg–Cu ТА ЇХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

В.Є. Федорчук<sup>1</sup>, А.Г. Покляцький<sup>1</sup>, Ю.В. Фальченко<sup>1</sup>, Г.П. Кісла<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>НТТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Досліджено вплив добавок скандію на структуру і механічні властивості литого металу, листових напівфабрикатів і стикових з'єднань, отриманих аргонодуговим зварюванням неплавким електродом алюмінієвих сплавів системи легування Al–Zn–MgCu. Показано, що у скандієвмісних сплавах як в литому металі, так і в їх листових напівфабрикатах, всі структурні складові мають менші розміри, ніж в сплавах без скандію, що забезпечує межу міцності листів на рівні 640...700 МПа в залежності від вмісту в них основних легуючих елементів. Встановлено, що при аргонодуговому зварюванні плавким електродом листів товщиною 3 мм сплавів зі скандієм, сумарна протяжність зони знеміцнення скорочується на 2 % при одночасному підвищенні твердості металу шва, що забезпечує більш високі механічні властивості таких сполук. При комплексному введенні скандію одночасно в основний матеріал і присадний дріт, що забезпечує його вміст у шві на рівні 0,30...0,35 %, вдається значно підвищити стійкість зварних з'єднань сплавів системи легування Al–Zn–Mg–Cu проти утворення кристалізаційних гарячих тріщин. Бібліогр. 16, табл. 3, рис. 4.

*Ключові слова:* алюмінієві сплави, система легування Al–Zn–Mg–Cu, скандій, мікроструктура, механічні властивості, гарячі тріщини

## SCANDIUM EFFECT ON THE PROPERTIES AND STRUCTURE OF ALLOYS OF Al-Zn-Mg-Cu SYSTEM AND THEIR WELDED JOINTS

V.E. Fedorchuk<sup>1</sup>, A.G. Poklyatskii<sup>1</sup>, Yu.V. Falchenko<sup>1</sup>, G.P. Kislaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@isi@nas.ua

<sup>2</sup>NTUU «Igor Sikorsky KPI», 37 Pobedy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

The effect of scandium additives on the structure and mechanical properties of cast metal, sheet semi-finished products and butt joints made by nonconsumable electrode argon-arc welding of aluminium alloys of Al-Zn-Mg-Cu alloying system was studied. It is shown that in scandium-containing alloys, both in the cast metal, and in their sheet semi-finished products, all the structural components have smaller dimensions, than in the alloys without scandium, that ensures the ultimate strength of the sheets on the level of 640 – 700 MPa, depending on their content of the main alloying elements. It is established that in nonconsumable argon-arc welding of 3 mm sheets from scandium-containing alloys the total length of the softening zone is reduced by 20% at simultaneous increase of weld metal hardness that provides higher mechanical properties of such joints. Complex addition of scandium to base material and filler wire simultaneously that ensures its content in the weld on the level of 0.30 – 0.35% allows significantly increasing the resistance of welded joints of alloys of Al-Zn-Mg-Cu system to hot solidification cracking. 16 Ref., 3 Tabl., 4 Fig.

*Keywords:* aluminium alloys, Al-Zn-Mg-Cu alloying system, scandium, microstructure, mechanical properties, hot cracks

Поступила в редакцію 17.01.2019

31 марта 1948

По инициативе академика Е. О. Патона был основан научно-технический и производственный журнал «Автоматическая сварка» (первые два года сборник «Труды по автоматической сварке под флюсом»). По широте, охвату и глубине освещения опубликованных материалов выпуски журнала за 71 год его издания часто называют сварочной энциклопедией. Он помог становлению уже нескольких поколений сварщиков.





**Подписка – 2019 на журнал «Автоматическая сварка»**  
[www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as](http://www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as)  
 Подписной индекс 70031

Украина		Зарубежные страны	
на полугодие	на год	на полугодие	на год
990 грн.	1980 грн.	90 дол. США	180 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств: ДП «Преса», «Пресцентр», «Меркурий» (Украина); каталог зарубежных изданий «Белпочта» (Беларусь); каталог АО «Казпочта» Издания Украины (Казахстан); каталог «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать», Объединенный каталог «Пресса России» (РФ).



**Подписка – 2019 на журнал «The Paton Welding Journal»**  
[www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj](http://www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj)  
 Подписной индекс 21971

Украина		Зарубежные страны	
на полугодие	на год	на полугодие	на год
2400 грн.	4800 грн.	192 дол. США	384 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

Журнал «Автоматическая сварка» в полном объеме переиздается на английском языке под названием «The Paton Welding Journal». Журналы распространяются по редакционной подписке (тел./факс: 38044 200-82-77, E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)).



**Правила для авторов, лицензионные соглашения, архивные выпуски журналов на сайте издательства [www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com).**

**В 2019 г. в открытом доступе выпуски журналов с 2009 по 2017 гг. в формате \*.pdf.**

**Реклама в журналах «Автоматическая сварка» и «The Paton Welding Journal»**

- Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров**
- ◆ Первая страница обложки, 200×200 мм
  - ◆ Вторая, третья и четвертая страницы обложки, 200×290 мм
  - ◆ Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки, 200×290 мм
  - ◆ Вклейка А4, 200×290 мм
  - ◆ Разворот А3, 400×290 мм
  - ◆ А5, 165×130 мм

- Стоимость рекламы**
- ◆ Цена договорная
  - ◆ Предусмотрена система скидок
  - ◆ Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
  - ◆ Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)
  - ◆ Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Подписано к печати 14.05.2019. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 12,03. Усл.-отт. 12,43. Уч.-изд. л. 13,26 + 2 цв. вклейки. Печать ООО «ДИА».

03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.