



## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШВОВ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ, ИМИТИРУЮЩИХ КОСМИЧЕСКИЕ

А. А. БОНДАРЕВ, д-р техн. наук, Е. Г. ТЕРНОВОЙ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены особенности формирования швов сварных соединений алюминиевых и магниевых сплавов, полученных электронно-лучевой сваркой, под влиянием изменяющихся сил гравитации и низких температур. Показано влияние перечисленных факторов и содержание растворенного водорода в основном металле на прочность соединений, образование дефектов и потерю легирующих элементов из металла шва.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, летающая лаборатория, алюминиевые сплавы, магниевые сплавы, условия гравитации, низкая температура, жидкий азот, растворенный водород, пористость, прочность, испарение легирующих элементов, микрорентгеноспектральный анализ

Алюминиевые и магниевые сплавы являются основными конструкционными материалами для аэрокосмического аппаратостроения [1–4]. Вероятно, что уже в недалеком будущем может возникнуть реальная потребность в применении сварки в условиях околоземного космоса или на поверхности Луны [5, 6]. Это могут быть монтажно-сборочные операции при создании космических комплексов или ремонтно-профилактические работы, связанные с обеспечением длительной эксплуатации действующих систем [7]. Анализ номенклатуры сварочных работ, выполняемых в космосе, показывает, что чаще всего придется соединять материалы толщиной от 0,5 до 4,0 мм. В связи с этим важным фактором при получении объективной оценки сварных соединений алюминиевых сплавов указанной толщины в этих условиях является выбор способа сварки. При этом необходимо руководствоваться таким основным критерием, как получение сварных соединений высокого качества, равнопрочных с основным металлом, без пор и трещин, без снижения пластичности шва и околошовной зоны при минимальных потерях легирующих элементов в сварном соединении [8]. С учетом отмеченного при создании космических конструкций, требующих высокую надежность соединения, минимальные массу и объем используемой аппаратуры, полную автоматизацию процесса сварки и его малую энергоемкость, наиболее эффективным является применение электронно-лучевой сварки [5].

При сварке плавлением алюминиевых сплавов в наземных условиях в шве и зоне термического влияния (ЗТВ) возникают различного рода макро-

и микродефекты [9], которые приводят к снижению прочности и пластичности соединений, а иногда и потере их герметичности [10, 11]. Не исключено появление подобных дефектов и при сварке этих материалов в условиях космического полета (наличие микрогравитации, низкой температуры, глубокого вакуума). Кроме того, оказывает влияние исходный состав используемого материала [12]. При этом существенно изменяется характер протекания ряда физических процессов: полностью или частично отсутствуют гравитационные силы, резко возрастает роль термокапиллярной и химической конвекции, из-за разницы плотности практически полностью отсутствует разделение фаз, намного увеличивается влияние сил поверхностного натяжения и адгезии [13–15].

Цель проведенных исследований заключалась в изучении влияния перечисленных факторов на качество формирования швов и свойства сварных соединений алюминиевых сплавов АД0, АМг3, АМг6, 1201 и магниевого сплава ИМВ-2. Исследования выполняли при изменении гравитации в интервале  $g/g_0$  от  $1 \cdot 10^{-2}$  до 2 (где  $g_0$  — ускорение свободного падения;  $g$  — действующее ускорение) и фиксируемой температуре образцов +20, –100, –120 и –196 °С.

В процессе исследований выполняли сквозные проплавления пластин и сварку стыковых соединений указанных сплавов толщиной 2,0 и 2,5 мм.

Химический состав и временное сопротивление разрыву исследуемых сплавов приведены в табл. 1.

Сплав АМг6 был различных плавок с концентрацией растворенного водорода 0,2, 0,3, 0,5 и 0,6 см<sup>3</sup>/100 г. Перед загрузкой в камеру свариваемые образцы подвергали шабрению на глубину 0,05 мм. Время выдержки на воздухе образцов не превышало 10 мин. Затем их плотно закрепляли к неподвижному столу, который после вакуумирования камеры охлаждали жидким азотом.



Абсолютное давление в камере, которое не превышало  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па, поддерживали с помощью криогенного сорбционного насоса. В процессе сварки регистрировали следующие параметры: ток пучка, ток фокусировки, напряжение питания энергетического комплекса от бортовой сети постоянного тока, скорость сварки, действующее на сварочную ванну ускорение, температуру образца и абсолютное давление в камере. Сварку выполняли на режимах, приведенных в табл. 2 с ускоряющим напряжением 15 кВ и диаметром пучка не более 1,5 мм, расстояние от торца пушки до поверхности образца составляло 120 мм.

Условия кратковременной микрогравитации обеспечивала летающая лаборатория (ЛЛ) Ту-104А, на борту которой размещалась установка А-1084М с высокочастотным электронно-лучевым источником питания и малогабаритной, перемещаемой по двум координатам пушкой ОБ 717 (рис. 1).

При проведении экспериментов на расплавленную сварочную ванну действовали следующие ускорения:  $-g/g_0 \leq \leq 1 \cdot 10^{-2}$  (микрогравитация),  $1/6$  (ускорение свободного падения на поверхности Луны),  $1$  (ускорение свободного падения на поверхности Земли), не менее  $2$  (более чем двухкратная перегрузка).

Качество соединений оценивали по результатам анализа рентгенограмм и макрошлифов швов, распределению легирующих элементов и особен-

**Таблица 1. Химический состав (мас. %) и временное сопротивление разрыву исследуемых сплавов**

Марка сплава	Mg	Cu	Al	Mn	Zn	Cd	Fe	$\sigma_{в}$ , МПа
АМг6	6,2	0,1	Осн.	0,60	0,2	—	0,40	320
АМг3	3,5	0,1	»	0,50	0,2	—	0,50	230
ФД0	0,3	0,1	»	0,15	0,2	—	0,30	80
1201	—	6,2	»	0,30	—	—	0,10	370
ИМВ-2*	Осн.	—	5,0	0,30	1,4	4,2	0,01	250

\* В данном сплаве 2 мас. % Li.

**Таблица 2. Режимы электронно-лучевой сварки при получении соединений исследуемых сплавов**

№ образца	Марка сплава	Толщина, мм	Вид образца	Ток пучка, мА	Скорость сварки, м/ч
1	АМг6	2,0	Стык с проплавлением	90	36
2	1201	2,0	» »	100	26
3	АМг3	2,5	Наплавленный валик с проплавлением	100	36
4	АД0	2,0	То же	100	30
5	ИМВ-2	2,5	» »	70	36

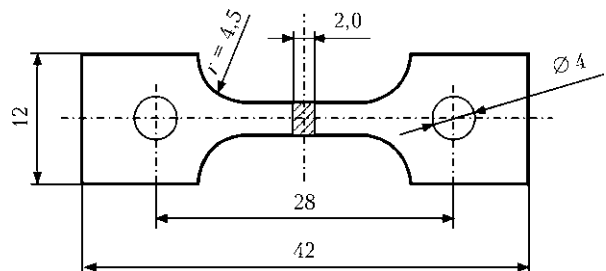


Рис. 2. Схема образца для испытаний на временное сопротивление разрыву



Рис. 1. Установка для электронно-лучевой сварки образцов при комнатной и низкой температурах в условиях кратковременной невесомости на борту ЛЛ Ту-104А



Рис. 3. Внешний вид сварных соединений сплавов АМг6 (а), 1201 (б), АМг3 (в), АД0 (г) и ИМВ-2 (д), полученных электронно-лучевой сваркой в условиях кратковременной невесомости на ЛЛ Ту-104А

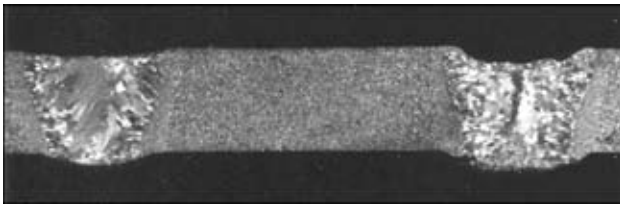


Рис. 4. Макрошлифы сварных соединений сплава АМг6, полученных электронно-лучевой сваркой на одинаковом режиме при  $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$  (слева) и  $\geq 2$  (справа)

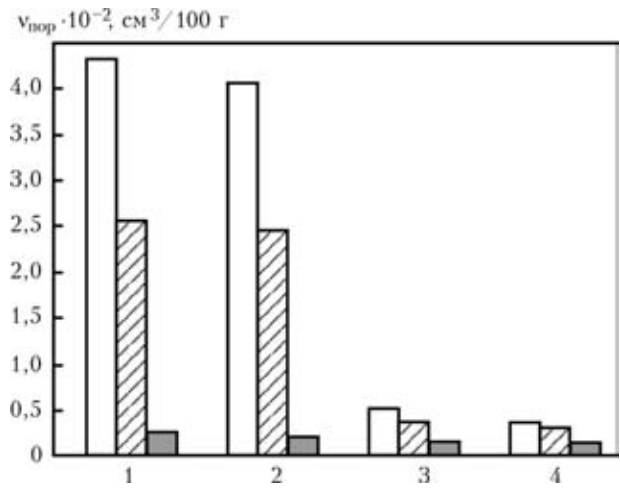


Рис. 5. Диаграмма склонности к пористости  $v_{пор}$  сварных соединений сплава АМг6 с концентрацией водорода 0,6 (белый столбик), 0,4 (заштрихованный) и 0,2 см<sup>3</sup>/100 г (серый), полученных при различном ускорении: 1 —  $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$ ; 2 — 1/6; 3 — 1; 4 —  $\geq 2$

ностям структуры металла шва и ЗТВ, а также по значениям временного сопротивления разрыву соединений. С этой целью изготавливали малогабаритные образцы (рис. 2). Поперечные и продольные макрошлифы выявляли травлением в растворе кислот 72 % HCl, 24 % HNO<sub>3</sub>, 4 % HF.

При визуальном наблюдении процесса электронно-лучевой сварки во всем диапазоне действующих ускорений не было зафиксировано случаев выброса жидкого металла из ванны или отличий в формировании сварных соединений по сравнению с земными условиями. Внешний вид сварных соединений, полученных в условиях кратковременной невесомости (рис. 3), свидетельствует о том, что характер их формирования ничем не отличается от наземных. Необходимо отметить, что при сварке в условиях перегрузки ( $g/g_0 \geq 2$ ) швы на образцах из исследуемых сплавов получены с заниженной технологической вы-

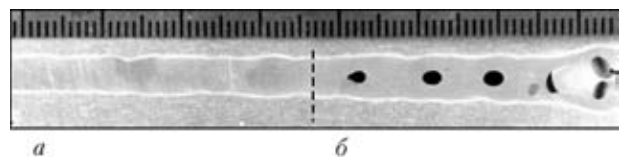


Рис. 6. Поверхностный продольный срез на соединении сплава АМг6 с концентрацией водорода 0,4 см<sup>3</sup>/100 г, полученном электронно-лучевой сваркой при  $g/g_0 \geq 2$  и  $\leq 1 \cdot 10^{-2}$ , в условиях перегрузки (а) и невесомости (б)

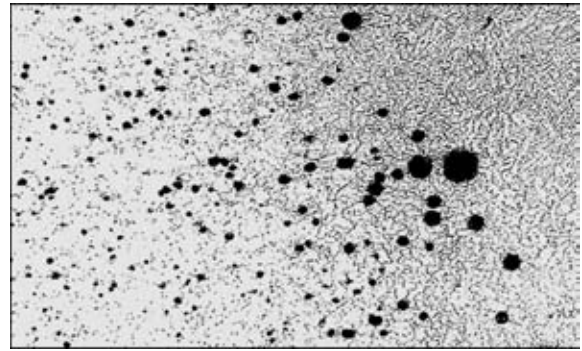


Рис. 7. Микроструктура ( $\times 150$ ) с характерной пористостью в зоне частичного оплавления сварного соединения сплава АМг6, полученного электронно-лучевой сваркой при  $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$

пуклостью верхней части и провисающем корне (рис. 4). Это свидетельствует о том, что значительные силы гравитации оказывают существенное влияние на расплавленную сварочную ванну и, как следствие, на геометрию шва.

Анализ рентгенограмм и послойных поверхностных срезов макрошлифов сварных соединений показал, что при всех вариантах сварки сплавов АМг3, АД0, ИМВ-2 и АМг6 с концентрацией растворенного водорода 0,2 см<sup>3</sup>/100 г пористость в металле швов составляет менее 0,1 · 10<sup>-2</sup> см<sup>3</sup>/100 г или полностью отсутствует. При сварке сплава АМг6 с кон-

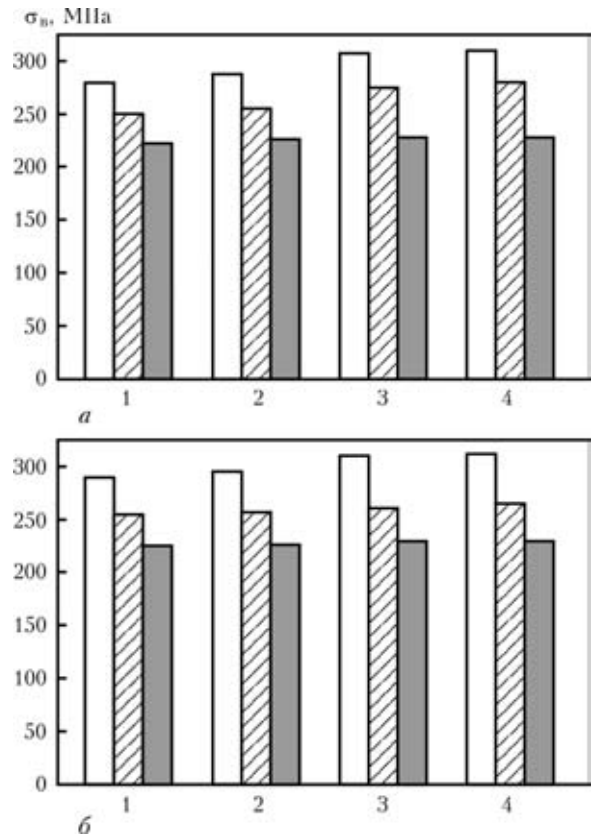


Рис. 8. Диаграмма временного сопротивления  $\sigma_b$  сварных соединений сплавов АМг6 (с концентрацией водорода 0,3 см<sup>3</sup>/100 г) (белый столбик), ИМВ-2 (заштрихованный) и АМг3 (серый), полученных при  $T = 20$  (а) и  $-196$  °С (б) в зависимости от уровня гравитации: 1 —  $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$ ; 2 — 1/6; 3 — 1,0; 4 —  $\geq 2$

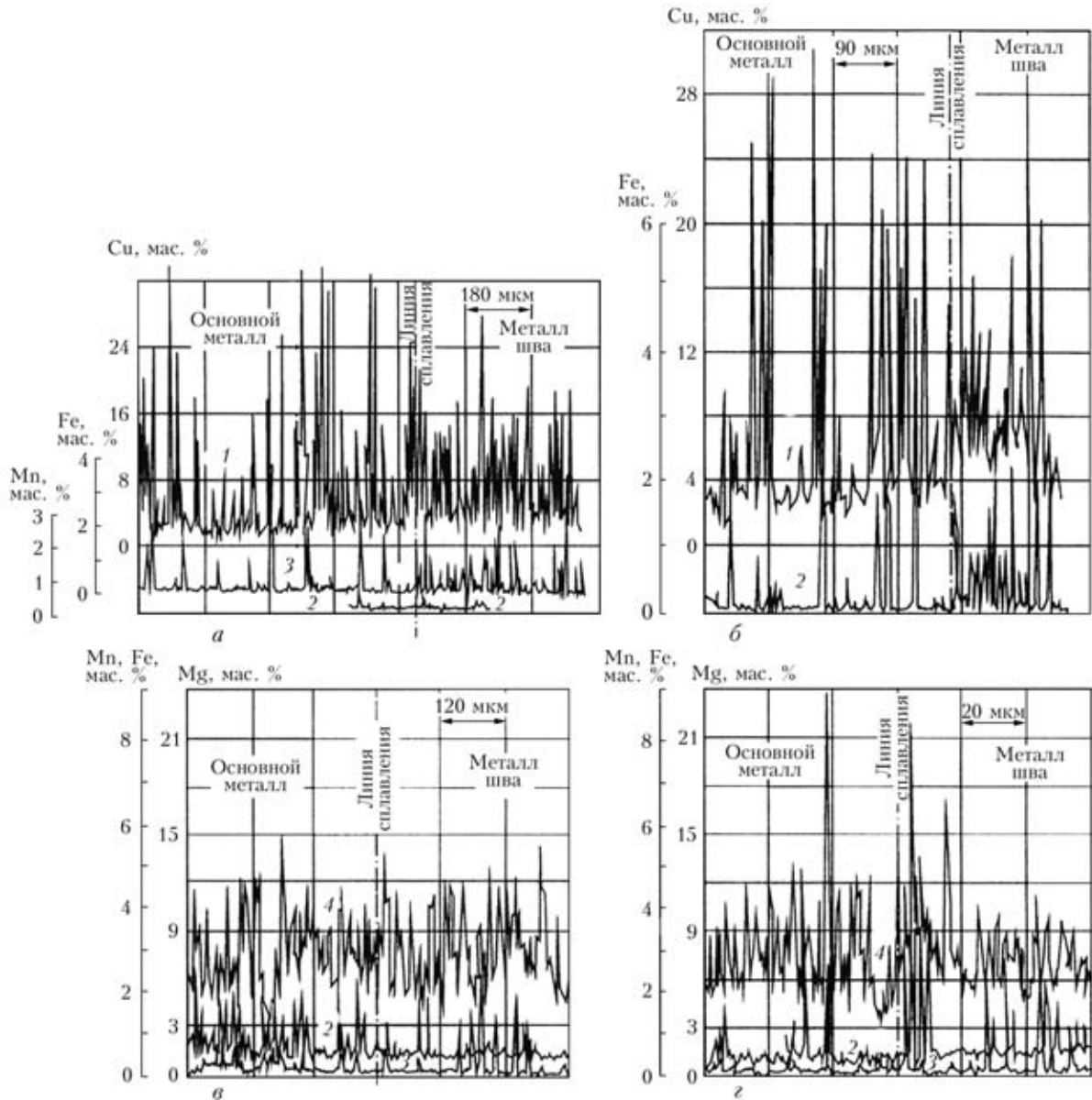


Рис. 9. Распределение легирующих и примесных элементов в сварных соединениях сплавов 1201 (а, б) и АМг6 (в, з), полученных электронно-лучевой сваркой в наземных условиях (а, в) и в невесомости (б, з): 1 — медь; 2 — марганец; 3 — железо; 4 — магний

центрацией растворенного водорода  $0,3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  и более в металле швов имеет место увеличение пористости, что особенно проявляется при снижении уровня гравитационных сил ( $g/g_0 = 1/6$  и  $\leq 1 \cdot 10^{-2}$ ) (рис. 5). В этих условиях суммарный объем пор иногда достигает  $4,42 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . Кроме того, значительно возрастает размер отдельных пор, которые могут достигать  $2,0 \dots 2,5 \text{ мм}$  в диаметре (рис. 6, б).

Сварные соединения термоупрочняемого сплава 1201, полученные в условиях, близких к невесомости ( $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$ ), отличаются повышенным количеством микропор по сравнению со сварными соединениями, полученными в наземных условиях. Эти микропоры расположены пре-

имущественно на участке частичного оплавления (рис. 7).

Определено, что плотность металла сварных швов, выполненных на исследуемых материалах, не зависит от температурных условий сварки. Сопоставив значения прочности сварных соединений сплавов АМг6 (с концентрацией водорода  $0,3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ) и ИМВ-2, полученных при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  и различных значениях  $g/g_0$  (рис. 8, а), можно отметить тенденцию к снижению прочности при  $g/g_0 = 1/6$  и  $\leq 1 \cdot 10^{-2}$ , для сплава АМг3 эти значения остались неизменными. При сварке в условиях низкой температуры и различных значениях  $g/g_0$  (рис. 8, б) также наблюдается закономерность повышения прочности с ростом уров-



**Таблица 3. Временное сопротивление разрыву (МПа) при 20 °С соединений сплава 1201, полученных в различных технологических условиях**

Температура обработки $T, ^\circ\text{C}$	Ускорение $g/g_0$ , действующее на сварочную ванну			
	$\leq 1 \cdot 10^{-2}$	1/6	1	$\geq 2$
+20	$\frac{237}{243}$	$\frac{228}{261}$	$\frac{245}{292}$	$\frac{248}{301}$
-100	$\frac{259}{264}$	$\frac{254}{281}$	$\frac{269}{297}$	$\frac{303}{308}$
-120	$\frac{271}{273}$	$\frac{279}{289}$	$\frac{282}{291}$	$\frac{307}{312}$
-196	$\frac{266}{275}$	$\frac{291}{296}$	$\frac{310}{328}$	$\frac{314}{329}$

Примечания. 1. В числителе приведены данные для сварного соединения без термообработки, в знаменателе — с искусственным старением. 2. Временное сопротивление разрыву основного металла, испытанного в исходном состоянии (закалка + искусственное старение), составляет  $\sigma_b = 454$  МПа. 3. Для механических испытаний выбирали участки, не содержащие видимых дефектов при рентгеновском контроле. 4. Представленные данные получены путем усреднения пяти испытаний.

ня гравитации. При этом сохраняются аналогичные значения прочности.

Испытания на временное сопротивление разрыву основного металла термоупрочняемого сплава 1201 выполняли в состоянии поставки (без термообработки). Сварные соединения испытывали с термообработкой ( $T = 180$  °С в течение 12 ч) и без нее. Значения временного сопротивления разрыву соединений сплава 1201 приведены в табл. 3.

Анализ результатов механических испытаний сплава 1201 показывает, что сварные соединения, полученные в условиях, близких к невесомости ( $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$ ), характеризуются наименьшими значениями прочности (табл. 3). С увеличением ускорений прочность сварных соединений, полученных при температуре 20 °С, повышается с 230 до 250 МПа, а после искусственного старения — с 240 до 300 МПа. При сварке с охлаждением образцов до температуры -196 °С прочность соединений, полученных при  $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$ , также увеличивается до 270 МПа, а при  $g/g_0 \geq 2$  значительно возрастает (до 320 МПа). Таким образом, повышение гравитации и наличие низких температур способствуют увеличению уровня временного сопротивления соединений из сплава 1201 после сварки до 315 МПа, а вследствие искусственного старения — до 330 МПа.

При исследовании свариваемости указанных сплавов с помощью микрорентгеноструктурного анализа структуры (микроанализатор SX-50 фирмы «Самеса») изучали влияние перечисленных факторов на испарение легирующих элементов (рис. 9). Химический состав металла исследуемых

швов, выполненных при различных технологических вариантах сварки, практически не зависит от температуры образца и давления в камере и близок к основному металлу. Проанализировав характер распределения легирующих элементов в соединениях сплава АМг6, полученных в наземных условиях, можно отметить, что максимальное содержание магния в основном металле и металле шва составляет около 15 мас. %, а при  $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$  — свыше 21 мас. % в основном металле и более 15 мас. % в металле шва. В соединениях сплава 1201, полученных в наземных условиях, имеет место резкое повышение содержания меди (свыше 28 мас. %) как в основном металле, так и в металле шва. Аналогичное повышение содержания меди происходит и в сварном соединении сплава 1201, полученном при  $g/g_0 \leq 1 \cdot 10^{-2}$ . В нем наблюдается тенденция к увеличению содержания меди в металле шва на 1,5...2,0 мас. % по сравнению с основным металлом.

## Выводы

1. Установлено, что отрицательное влияние невесомости и перегрузок на формирование сварных соединений алюминиевых и магниевых сплавов не проявляется. Не зафиксированы также выбросы жидкого металла из сварочной ванны.

2. Алюминиевые сплавы АД0, АМг6 и магниевый сплав ИМВ-2 хорошо свариваются электронно-лучевой сваркой в условиях низких гравитационных сил и низкой температуры (до -196 °С), когда концентрация растворенного в основном металле водорода не превышает 0,2 см<sup>3</sup>/100 г. Условия, близкие к невесомости, способствуют повышению пористости в металле швов, выполненных на алюминиевых сплавах с концентрацией водорода 0,3 см<sup>3</sup>/100 г и выше.

3. Увеличению значений временного сопротивления сварных соединений сплавов АМг6, АМг3, АД0 и 1201 на 10...15 % способствуют условия повышенной гравитации и низкая температура (-100...-196 °С).

4. Искусственное старение сварных соединений сплава 1201, полученных при 20 °С и низкой температуре при всех действующих на сварочную ванну ускорениях, дополнительно повышает значение временного сопротивления соединений на 10...15 %.

1. Николаев Г. А., Фридляндер И. Н., Арбузов Ю. П. Свариваемые алюминиевые сплавы. — М.: Металлургия, 1990. — 296 с.
2. Рабкин Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.
3. Дриц М. Е., Свидерская З. А., Елкин Ф. М. Сверхлегкие конструкционные сплавы. — М.: Наука, 1972. — 142 с.
4. Осокина Т. Н., Каран А. Б., Якушин Б. Ф. Сварка магниевых сплавов с литием // Автомат. сварка. — 1978. — № 1. — С. 48–50.



5. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. — Киев: Наук. думка, 1998. — 184 с.
6. Патон Б. Е., Дудко Д. А., Лапчинский В. Ф. Перспективы прикладных проблем космической технологии металлов. — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 3–6.
7. Суэдзава Э. Космические станции и колонии. Сварка в космосе // Техника сборки и соединения. — 1989. — № 9. — С. 66–75.
8. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
9. Никифоров Г. Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. — М.: Машиностроение, 1972. — 264 с.
10. Soete W. De problematiek van de lasfouten en de moeilijkheden van de breukmechanica // Rev. Soudure. — 1971. — 27, № 3. — S. 198–203.
11. Ishii Yugoro, Iida Kunihire. Low and intermediate cycle fatigue strength of butt welds containing weld defects // J. NDI. — 1969. — 18, № 10. — P. 443–476.
12. Космос: технологии, материаловедение, конструкции: Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона, 2000. — 528 с.
13. Беляков И. Т., Борисов Ю. Д. Технология в космосе. — М.: Машиностроение, 1974. — 292 с.
14. Ганиев Р. Ф., Лапчинский В. Ф. Проблемы механики в космической технологии. — М.: Машиностроение, 1978. — 116 с.
15. Космическое материаловедение / Пер. с англ.; под ред. В. С. Авдеевского. — М.: Мир, 1989. — 262 с.

Features of weld formation in welded joints of aluminium and magnesium alloys made by electron beam welding under the influence of varying gravity forces and low temperatures are given. Influence of the above factors and content of dissolved hydrogen in the base metal on joint strength, defect formation and loss of alloying elements from the weld metal is shown.

Поступила в редакцию 01.03.2010

**21-24**  
**ИЮНЯ 2011**  
**Нижний Новгород**

**X Международная специализированная выставка**  
**МАШИНОСТРОЕНИЕ**  
**СТАНКИ**  
**ИНСТРУМЕНТ** **MaDIn**

**XV Международная специализированная выставка**  
**СВАРКА-2011**

Всероссийское ЗАО "Нижегородская ярмарка"  
603086, г. Нижний Новгород, ул. Совнаркомовская, 13  
тел. (831) 277-54-96, 277-55-89 факс: 277-55-86  
E-mail: kaa@yarmarka.ru, levin@yarmarka.ru  
<http://www.yarmarka.ru>