



## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1441, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ СВАРКИ

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук, чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО,  
А. А. ГРИНЮК, М. Р. ЯВОРСКАЯ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведен сравнительный анализ прочности и твердости в соединениях сплава 1441, полученных способами сварки плавлением и трением с перемешиванием. Показано, что процесс получения соединения за счет пластификации металла без его расплавления позволяет избежать образования характерных для алюминиево-литиевых сплавов дефектов и повысить предел прочности сварных соединений. Выявлено, что швы, полученные сваркой трением с перемешиванием, несимметричны относительно своей продольной оси. Установлено, что разрушение образцов при статических испытаниях происходит с той стороны, откуда металл вытесняется рабочим наконечником инструмента.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, сварка трением с перемешиванием, алюминиево-литиевые сплавы, прочность, твердость, механические свойства

К материалам, применяемым в сварных конструкциях авиакосмической техники, предъявляются особые требования в части обеспечения минимального веса, высокой прочности, большого ресурса и экономической эффективности эксплуатации сварных конструкций. Удовлетворение этим требованиям в конечном счете определяет конкурентоспособность летательных аппаратов. Использование алюминиево-литиевых конструкционных сплавов с низкой плотностью и повышенным модулем упругости является приоритетным направлением совершенствования современных летательных аппаратов [1, 2].

Одним из наиболее перспективных материалов для изготовления различных узлов такой техники является сплав 1441 системы легирования Al–Cu–Mg–Li, имеющий наилучшую технологичность при холодной и горячей деформации. Сплав на основе алюминия имеет следующий химический состав, мас. %: 1,6 Cu; 1,1 Mg; 1,6 Li; 0,07 Zr; 0,04 Ti; 0,09 Fe; 0,03 Si и 0,05 Mn. Удачное соотношение концентрации основных легирующих элементов при ограниченном содержании примесей позволяет получать холоднокатаные листы толщиной до 5,0 мм по технологии, близкой к используемой при производстве листов из сплава Д16. Листы сплава 1441 имеют высокие прочностные характеристики: предел прочности 440 МПа, предел текучести 330 МПа, относительное удлинение 14,6 %, угол загиба 16°, плотность сплава составляет 2,6 г/см<sup>3</sup>, модуль упругости 78,4 ГПа [2]. Однако при сварке плавлением этого перспективного для летательной техники сплава возникают определенные трудности. Во-первых, на-

личие в его составе лития приводит к образованию поверхностного газонасыщенного слоя, способствующего повышенному порообразованию в сварных соединениях [3]. Во-вторых, как и все литиевые сплавы, при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом он имеет высокую склонность к образованию протяженных включений оксидной пленки в швах [4]. В-третьих, необратимость физико-химических процессов, происходящих в сварочной ванне под воздействием высокотемпературного источника нагрева, приводит к фазовым превращениям и разупрочнению металла в зоне сварки [5]. В результате соединения сплава 1441, полученные сваркой плавлением, имеют низкие механические свойства. Если из технологического процесса сварки сплава исключить разогрев зоны соединения до температуры солидуса, можно избежать этих сложностей, устранить условия для возникновения дефектов и повысить прочность швов.

Получить неразъемные соединения без расплавления основного металла можно сваркой трением с перемешиванием [6, 7]. Принцип формирования шва при таком способе соединения основан на нагреве за счет трения металла в зоне сварки до пластического состояния, перемешивании его по всей толщине свариваемых кромок и пластическом деформировании в результате прижатия рабочего инструмента к поверхностям свариваемых деталей. При этом металл не нагревается до температуры плавления, поэтому в шве и металле ЗТВ степень фазово-структурных превращений намного ниже, чем при сварке плавлением.

Для сравнительной оценки механических свойств, структуры и твердости соединений сплава 1441 листы толщиной 2,0 мм сваривали наиболее распространенными дуговыми способами

Таблица 1. Режимы сварки листов толщиной 2,0 мм сплава 1441

Способ сварки	$I_{св}$ , А	$v_{св}$ , м/ч	$v_{пр}$ , м/ч	$d_{пр}$ , мм	$Q_{пл}$ , л/мин	$U_d$ , В
Аргонодуговая плавящимся электродом	55	30	105	1,6	—	17,2
Аргонодуговая неплавящимся электродом	150	14	75	1,6	—	—
Плазменно-дуговая неплавящимся электродом	165	36	110	1,6	0,3	—

сварки (табл. 1), электронно-лучевой, а также сваркой трением с перемешиванием.

Электронно-лучевую сварку выполняли на токе 45 мА при ускоряющем напряжении 30 кВ со скоростью 60 м/ч. Присадочную проволоку диаметром 1,0 мм подавали со скоростью 180 м/ч.

Сварку трением с перемешиванием проводили со скоростью 14 м/ч вращающимся с частотой 2880 об/мин инструментом с диаметром бурта 12 мм.

Из полученных стыковых соединений изготавливали стандартные образцы для определения предела прочности и угла загиба сварных соединений. Прочность металла шва оценивали при испытании образцов с уменьшенным сечением в центральной части швов. Кроме того, на отдельных образцах определяли распределение твердости в швах и металле ЗТВ, а также рассматривали их структурные особенности. Результаты механических испытаний образцов, полученных различными способами сварки, приведены в табл. 2.

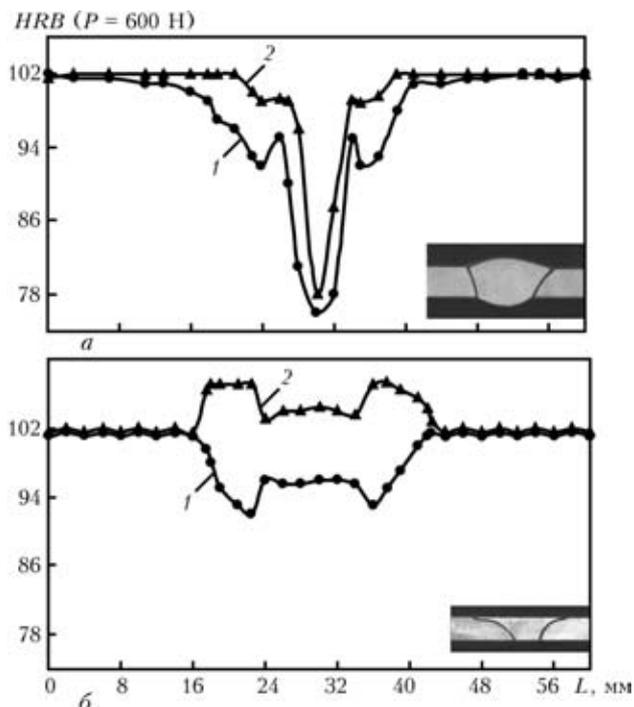
Анализ полученных результатов показал, что при аргонодуговой сварке плавящимся или неплавящимся электродом с использованием присадочной проволоки СвАМг63 прочность сварных соединений листов сплава 1441 может быть получена на уровне 315 МПа, что составляет около 72 % прочности основного металла. Применение более концентрированных источников нагрева сокращает время существования сварочной ванны, в результате не все газовые пузырьки успевают подняться на ее поверхность. Часть из них в виде мелких пор остается в зоне сплавления шва с основным металлом, снижая прочность соединений. Поэтому сварные соединения, полученные с той же присадочной проволокой плазменно-дуговой сваркой неплавящимся электродом, имеют прочность на уровне 305, а выполненные электронным лучом — 287 МПа. Использование присадочной проволоки на основе медной системы легирования Св1201 дает более низкие показатели прочности даже в случае модифицирования ее скандием, хотя на прочность металла шва скандий влияет положительно. В любом случае при сварке плавлением шов имеет литую структуру и его прочностные показатели ниже, чем сварного соединения.

При сварке трением с перемешиванием присадочный материал не используется и шов фор-

Таблица 2. Механические свойства сварных соединений листов толщиной 2,0 мм сплава 1441

Способ сварки	Присадочная проволока	$\sigma_b^{св}$ , МПа	$\sigma_b^{м.ш}$ , МПа	$\delta$ , град
Аргонодуговая плавящимся электродом	СвАМг63	$\frac{320...309}{315}$	$\frac{280...269}{277}$	$\frac{70...64}{67}$
	Св1201	$\frac{290...281}{284}$	$\frac{285...280}{284}$	$\frac{66...48}{57}$
Аргонодуговая неплавящимся электродом	СвАМг63	$\frac{315...312}{314}$	$\frac{288...280}{284}$	$\frac{136...132}{134}$
	1201+0,5%Sc	$\frac{305...288}{293}$	$\frac{308...305}{304}$	$\frac{75...62}{68}$
Плазменно-дуговая неплавящимся электродом	СвАМг63	$\frac{306...303}{305}$	$\frac{267...263}{266}$	$\frac{170...140}{152}$
	Св1201	$\frac{269...266}{267}$	$\frac{237...234}{235}$	$\frac{86...60}{73}$
Электронно-лучевая	СвАМг63	$\frac{288...285}{287}$	$\frac{257...254}{256}$	$\frac{86...77}{82}$
	Св1201	$\frac{290...280}{285}$	$\frac{265...260}{262}$	$\frac{57...53}{55}$
Трением с перемешиванием	—	$\frac{344...338}{341}$	$\frac{382...356}{366}$	$\frac{180...130}{155}$
	—	$\frac{417...415^*}{416}$	$\frac{439...436^*}{438}$	$\frac{58...54}{56}$

\* — механические свойства получены после искусственного старения образцов (150 °С — 24 ч).



Распределение твердости в соединениях сплава 1441 толщиной 2,0 мм, полученных плазменно-дуговой сваркой разнополярным асимметричным током (а) и сваркой трением с перемешиванием (б) после сварки (1) и искусственного старения (2)

мируется только за счет основного металла. Разрушение образцов также происходит по зоне сплавления шва с основным металлом, но прочность сварных соединений находится на уровне 341 МПа и составляет 78 % прочности свариваемых листов. При этом вследствие деформационного упрочнения пластифицированный металл шва имеет прочность около 366 МПа, поэтому образующееся при сварке трением с перемешиванием некоторое занижение шва не сказывается на прочности сварного соединения в целом. Угол загиба таких соединений находится на уровне основного металла и превышает аналогичные показатели, полученные при сварке плавлением. Кроме того, искусственное старение полученных соединений после сварки позволяет повысить их прочность до 416 МПа, что составляет 95 % исходной прочности листов.

Более высокая прочность соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, достигается благодаря меньшему уровню разупрочнения металла в зоне сварки (рисунок). Использование высокотемпературной плазменной струи приводит к существенному нагреву металла, в результате чего твердость его в зоне сплавления изменяется от *HRB* 95 (со стороны усиления шва) до *HRB* 81 (в корневой части). Литой металл шва имеет еще более низкую твердость (*HRB* 76), но разрушение образцов происходит по зоне сплавления, так как сечение шва увеличено за счет усиления. При сварке трением с перемешиванием

макроскопического расплавления металла не происходит. Он нагревается в результате трения только до пластического состояния, поэтому полученное распределение твердости на образцах, выполненных сваркой трением с перемешиванием, свидетельствует о меньшем тепловом воздействии на все участки сварного соединения. Так, в зоне сплавления шва с основным металлом минимальная твердость находится на уровне *HRB* 92. При этом металл шва имеет более высокую твердость (*HRB* 95), поскольку подвергается пластическому деформированию за счет прижатия инструмента к поверхностям свариваемых листов. В результате, несмотря на несколько уменьшенное рабочее сечение шва, разрушение образцов все равно происходит по зоне сплавления шва с основным металлом.

Кроме того, кривая распределения твердости свидетельствует о том, что полученный сваркой трением с перемешиванием шов несимметричен относительно своей продольной оси. Такая форма шва получается вследствие того, что пластифицированный металл с одной стороны (фронтальной) вытесняется рабочим наконечником инструмента на другую (тыльную) сторону. Именно с фронтальной стороны и происходит разрушение сварных образцов при статических испытаниях.

После искусственного старения образцов, полученных плазменно-дуговой сваркой, твердость металла шва повышается до *HRB* 78, а в зоне сплавления шва с основным металлом — до *HRB* 95–99. Дополнительное искусственное старение соединений, полученных трением с перемешиванием, позволяет повысить твердость металла шва до *HRB* 104. При этом твердость металла в зоне сплавления его со швом находится на уровне *HRB* 103–107, что обеспечивает существенное увеличение предела прочности сварных соединений, полученных трением с перемешиванием.

## Выводы

1. Среди распространенных способов сварки плавлением наиболее высокие механические свойства соединений литийсодержащего алюминиевого сплава 1441 достигаются при использовании плавящегося и неплавящегося электродов. Предел прочности таких соединений, полученных с использованием присадочной проволоки СвАМг63, находится на уровне 315 МПа, что составляет около 72 % исходной прочности листов. Применение более концентрированных источников нагрева (электронный луч и плазма) не позволяет повысить этот показатель вследствие высокой склонности сплава 1441 к порообразованию.

2. При сварке трением с перемешиванием уровень разупрочнения сварного соединения снижается, поскольку формирование шва происходит в результате пластического деформирования основ-

ного металла без его расплавления. Поэтому прочность сварных соединений повышается до 341 МПа, а прочность деформационно-упрочненного металла шва — до 366 МПа. При этом угол загиба сварных соединений находится на уровне основного металла.

1. *Приоритетные* направления совершенствования материалов для конструкций перспективных самолетов / В. Г. Дмитриев, Г. Н. Замула, В. В. Коновалов, Г. И. Нестеренко // Технология легких сплавов. — 2003. — № 1. — С. 3–8.
2. *Свойства* полуфабрикатов из высокотехнологичного Al-Li-сплава 1441 / И. Н. Фридляндер, В. В. Садков, В. С. Сандлер, Т. П. Федоренко // Там же. — 2002. — № 4. — С. 24–26.

Comparative analysis has been performed of the strength and hardness in joints of 1441 alloy produced by fusion and friction stir welding. It is shown that the process of producing the joint by metal plasticization without its melting allows avoiding formation of defects characteristic for the aluminium-lithium alloys and improving the ultimate strength of welded joints. It is found that the welds made by friction stir welding are not symmetrical relative to their longitudinal axis. It is established that fracture of samples at static testing occurs from the side, from which the metal is driven by the working tip of the tool.

3. *Илюшенко Р. В.* Влияние параметров режима сварки пульсирующей дугой в аргоне на пористость соединений сплава 1420 // Автомат. сварка. — 1990. — № 9. — С. 27–30.
4. *Покляцкий А. Г., Лозовская А. В., Гринюк А. А.* Предотвращение образования оксидных плен в швах при сварке литийсодержащих алюминиевых сплавов // Там же. — 2002. — № 12. — С. 45–48.
5. *Разупрочнение* высокопрочных алюминиевых сплавов при различных способах сварки плавлением / А. В. Лозовская, А. А. Чайка, А. А. Бондарев и др. // Там же. — 2001. — № 3. — С. 15–19.
6. *Dawes C. J., Thomas W. M.* Friction stir process welds aluminum alloys // Welding J. — 1996. — № 3. — P. 41–45.
7. *Степанов В. В., Конкевич В. Ю., Фролов В. А.* Формирование соединений при сварке трением по способу Friction Stir Welding // Технология легких сплавов. — 2003. — № 1. — С. 58–67.

Поступила в редакцию 26.09.2006

## **МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ВЫСТАВКА-КОНГРЕСС «МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИКА (МИР-2007)»**

2–5 октября 2007 г.

г. Санкт-Петербург «Ленэкспо»

*Цель выставки-конгресса: развитие взаимовыгодного международного сотрудничества, демонстрация передовых технологий и инновационных разработок в области мехатронных и робототехнических систем для расширения возможности их коммерциализации и вывода на рынки высокотехнологичной продукции*

### **Тематика выставки**

- ✓ Промышленная робототехника и автоматизация производства
- ✓ Роботы для экстремальных условий
- ✓ Транспортные мехатронные и робототехнические системы
- ✓ Роботы в социальной среде (сервисные работы)
- ✓ Роботы в медицине
- ✓ Системы управления и программное обеспечение
- ✓ Компоненты средств робототехники и мехатронные модули
- ✓ Технологии компьютерного проектирования

### **Тематика конгресса**

- ✓ Методы проектирования и моделирования мехатронных и робототехнических систем
- ✓ Области применения и перспективы развития мехатронных и робототехнических систем
- ✓ Системы и средства управления, навигация
- ✓ Групповое управление и мультиагентные системы
- ✓ Микро- и нанороботы
- ✓ Техническая диагностика мехатронных и робототехнических систем
- ✓ Компоненты мехатронных и робототехнических систем
- ✓ Подготовка кадров в области мехатроники и робототехники

**Дополнительную информацию можно получить по  
тел./факсу (812) 552-4162, 552-40-73, E-mail: spb.mr@rtc.ru, www.rtc.ru**