

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ТОНКОЛИСТОВЫХ ОБЪЕМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

А. А. БОНДАРЕВ, В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, доктора техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены варианты совершенствования технологии изготовления сварных объемных конструкций из тонколистовых элементов. Приведены примеры малогабаритных макетов конкретных изделий. Даны рекомендации по снижению остаточных деформаций тонколистовых сварных конструкций. Показаны варианты изготовления сварных тавровых соединений, имеющих место при производстве стрингерных панелей. Дана оценка стойкости сварных соединений образованию межкристаллитной коррозии.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, алюминиевые сплавы, тонколистовые объемные конструкции, разноименные сварные соединения, механические свойства, межкристаллитная коррозия, трещиностойкость

Широкое применение алюминиевых сплавов в различных отраслях промышленности обусловлено рядом их достоинств по сравнению с другими конструкционными материалами.

Алюминиевые сплавы характеризуются большим диапазоном временного сопротивления разрыву (100...750 МПа), имеют высокую удельную прочность (благодаря малой плотности — 2,7 г/см<sup>3</sup>). Кроме того, имеют высокие тепло- и электропроводность, коррозионную стойкость в различных агрессивных средах. Сплавы алюминия отличаются хорошей технологичностью, легко поддаются обработке давлением, позволяют получать из них сложные фасонные профили. Детали из алюминиевых сплавов широко используют в различного типа конструкциях в судостроении, автомобилестроении, на транспорте. При этом для изделий авиационной техники, выполненных из алюминиевых сплавов, характерны клепаные и болтовые соединения.

Клепаное соединение — основной вид соединения в конструкции планера, самолета и вертолета. Оно хорошо работает при статических, усталостных и повторных нагружениях и позволяет получать изделия без поводок и с соблюдением строгой конфигурации.

Существенным недостатком клепаного соединения являются утяжеление конструкции, высокая трудоемкость выполнения операций и, как следствие, большие экономические затраты.

Применение болтового соединения в алюминиевых конструкциях вызвано необходимостью периодического демонтажа отдельных элементов и узлов изделий в процессе их эксплуатации. Од-

нако изготовление болтового соединения весьма трудоемко и постановка одного болта почти в 10 раз больше трудоемкости установки одной заклепки.

Прогрессивным способом соединения конструкций из алюминиевых сплавов является сварка, которая упрощает процесс производства металлоконструкций и позволяет широко использовать автоматизацию и механизацию [1].

Сварка является одним из ведущих технологических процессов изготовления конструкций в различных отраслях народного хозяйства. Особо важное значение приобретает сварка при создании герметичных сварных узлов длительной эксплуатации. В самолетостроении уже во многих случаях произошла замена клепаных и болтовых соединений на контактную точечную, роликовую сварку или такие способы сварки плавлением, как аргонодуговая, микроплазменная, плазменная, сварка плавящимся электродом.

В последние десятилетия во многих странах развивается и совершенствуется способ электронно-лучевой сварки, в том числе и применительно к изготовлению конструкций из алюминиевых сплавов [2–4].

Конструкции, изготовленные с применением электронно-лучевой сварки, успешно эксплуатируются в условиях сложных нагружений, повышенных температур, глубокого вакуума, агрессивных сред. Используя одну и ту же аппаратуру, электронным лучом можно сваривать детали из алюминиевых сплавов различных толщин: от долей миллиметра до нескольких десятков сантиметров.

В последние годы интенсивно развивается и совершенствуется металлургическое производство новых сверхлегких высокопрочных алюминий-литиевых сплавов, применение которых в сварных конструкциях уменьшает массу изделий на 10...15%. Расширению масштабов использо-



вания таких сплавов в конструкциях способствует применение электронно-лучевой сварки. Как установлено ранее [1, 2], при электронно-лучевой сварке термически упрочняемых или нагартованных алюминиевых сплавов временное сопротивление разрыву соединений на 15...20 % выше, чем при использовании дуговых способов сварки, а остаточные сварочные деформации на порядок ниже.

В нашей работе сделаны первые попытки применения технологии электронно-лучевой сварки при изготовлении объемных конструкций из тонколистовых элементов алюминиевых сплавов различных систем легирования. Конструкции из алюминиевых сплавов проектируются из прокатных листов, штампованных гнутых и пресованных профилей, фасонных штамповок и поковок. Применение таких полуфабрикатов в конструкциях, выполняемых с использованием дуговых способов сварки, связано с целым рядом трудностей как на этапе подготовки к сварке, так и при сборке и сварке соединений. Прежде всего это борьба со сварочными деформациями, применением средств по упреждению их появления или последующим устранением. В этой ситуации еще больше возникает проблем при использовании в конструкции из тонколистовых элементов соединений внахлестку или на проплав верхнего листа.

Примеры изготовления электронно-лучевой сваркой объемных панелей из тонколистовых элементов, где имеют место самые трудновыполнимые дуговыми способами типы соединений, приведены на рис. 1. Чтобы добиться высокого качества соединений и точности соблюдения геометрических форм при электронно-лучевой сварке подобных конструкций необходимо строго выполнять целый ряд конструктивно-технологичес-

ких требований. Сборка фрагментов под сварку осуществляется в сборочно-сварочном приспособлении, которое должно гарантированно обеспечить отсутствие зазоров между контактирующими поверхностями свариваемых элементов. Кроме того, в приспособлении предусматриваются теплоотводящие элементы, которые располагаются с двух сторон на всем протяжении свариваемого шва. При этом обеспечивается формирование шва с небольшим усилением. Какие-либо деформации в этом случае (типа вспучиваний или прожогов) также отсутствуют. Параметры режима сварки должны быть заранее установлены в таких пределах, чтобы при ее выполнении нижняя деталь проплавлялась не более чем на 0,5 толщины. В таких конструкциях могут применяться как одно-, так и разноименные алюминиевые сплавы. Однако на этапе проектирования изделий, закладываемая в конструкцию тот или другой сплав алюминия, необходимо располагать сведениями об их склонности к образованию кристаллизационных трещин. Учитывая, что такие швы выполняются без использования присадочных материалов и отсутствуют условия для осуществления модифицирования металла шва за счет легирующих элементов, находящихся в присадке, сплавы должны быть заранее подобраны таким образом, чтобы их трещиностойкость была наилучшей. Если же при выполнении сварки трещинообразование имеет место, тогда в технологическом процессе должны быть заложены мероприятия для предотвращения трещин. Так, на рис. 2 показаны образцы сплава 1420 после их испытания на трещиностойкость в диапазоне скоростей 20...60 м/ч. На этом сплаве наблюдаются трещины небольшой протяженности только в начальной зоне образца, где он имеет утоненную форму. Обобщенные результаты исследований стойкости алюминиевых сплавов к образованию кристаллизационных трещин приведены на рис. 3 [5]. Из рисунка видно,

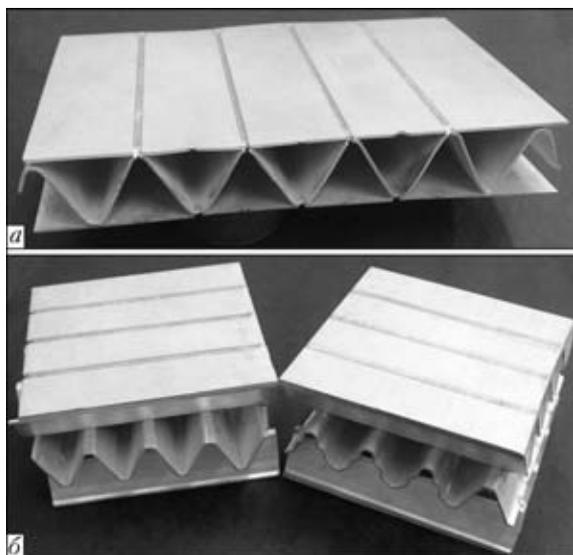


Рис. 1. Внешний вид макета тонколистовой (а) и объемной панели повышенной жесткости (б), изготовленных из алюминиевых сплавов электронно-лучевой сваркой

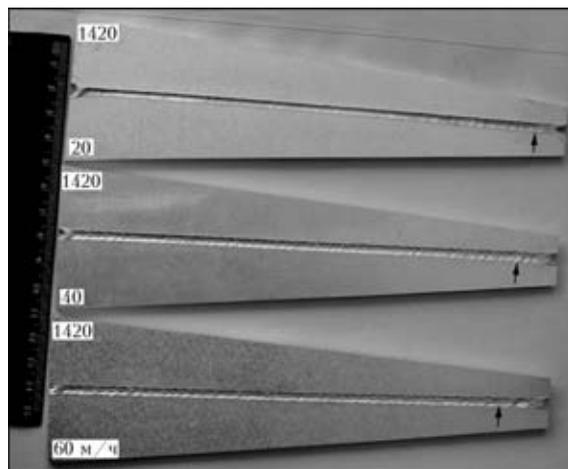


Рис. 2. Внешний вид сварных образцов из сплава 1420 после их испытания на трещиностойкость в диапазоне скоростей 20...60 м/ч

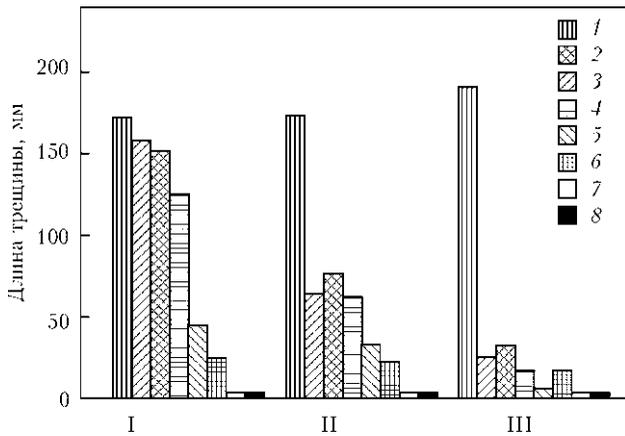


Рис. 3. Влияние скорости электронно-лучевой сварки на склонность алюминиевых сплавов к горячим трещинам: 1 — сплав Д16; 2 — АДО; 3 — 1460; 4 — 1201; 5 — АМц; 6 — 1420; 7 — 1570; 8 — АМг6; I —  $v_{св} = 20$ ; II — 40; III — 60 м/ч

что как и в сплаве АМг6 в новом высокопрочном сплаве 1570, легированном скандием, трещины отсутствуют. Кроме того, чем меньше скорость сварки, а следовательно, и меньше скорость кристаллизации металла шва, тем выше склонность к трещинообразованию.

К категории объемных тонколистовых конструкций могут быть отнесены и сварные стрингерные или оребренные панели (рис. 4). При их изготовлении с учетом специфики алюминиевых сплавов, а также расположения швов наиболее рациональным способом соединения является электронно-лучевая сварка [6, 7]. Процесс подготовки элементов, их сборка и сварка также отличаются высокой требовательностью к выполнению всех операций. Приварка ребер может осуществляться как односторонним угловым швом, так и наложением угловых швов с обеих сторон ребра. Как обычно использование присадочных материалов не практикуется, поскольку и в первом и во втором случае формируется на соединениях галтель с радиусом 1,5...3 мм. Параметры режима сварки обычно выбираются таким образом, чтобы проплавление нижнего полотнища не превышало 50 % его толщины. С этой целью в процессе сварки угол наклона электронного пучка обычно составляет 25...30° к плоскости панели. Во избежание значительных остаточных деформаций сварных панелей, как показали авторы работы [6], целесообразно использовать до сварки прием предварительного упругого растяжения свариваемых фрагментов (полотнища и ребер). Усилие растяжения не должно превышать условный предел текучести свариваемого сплава.

Однако с позиций обеспечения надежной работоспособности сварных конструкций выполнение приварки ребер, как показано на рис. 4, является нерациональным, поскольку сварные швы находятся в зоне концентрации напряжений при нагружении изделий. Перемещение сварных швов

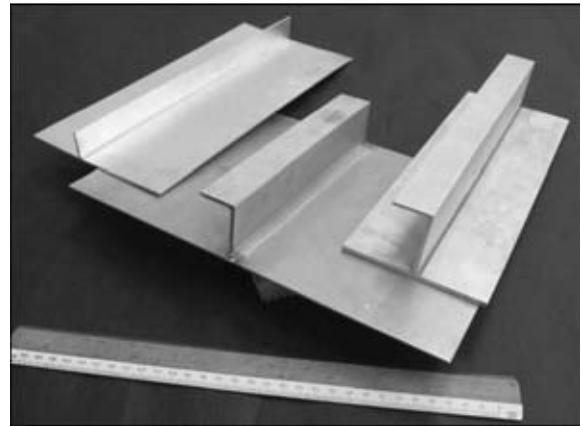


Рис. 4. Фрагменты тонколистовых стрингерных панелей, изготовленных с выполнением электронно-лучевой сварки одно- и двухсторонних угловых швов

в зону, удаленную от резких переходов, значительно повышает их надежность и работоспособность при нагружениях.

Как показала многолетняя практика, одним из факторов скрытого характера снижения сроков надежной и продолжительной эксплуатации сварных алюминиевых конструкций является их подверженность межкристаллитной коррозии, из очагов которой и начинается уже катастрофическое разрушение изделий. В наших разработках прошли испытания на межкристаллитную коррозию сварные соединения сплава Д16 и соединения разноименных алюминиевых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой.

Для проведения исследований из сварных соединений перпендикулярно сварным швам вырезали по четыре образца шириной 10 мм, длиной 20 мм и толщиной 2,5 мм. Исследования проводили химическим методом в соответствии с ГОСТ 9.021-74 «Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию».

Температура рабочего раствора составляла  $30 \pm 5$  °С, состав раствора: раствор хлористого натрия плюс 0,3 % перекиси водорода (58 г/л NaCl + 10 мл/л 33 % раствора H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), продолжительность испытаний 6 ч с последующим металлографическим анализом шлифов по глубине растравливания между зерен в соответствии с ГОСТ

**Механические свойства сварных соединений разноименных алюминиевых сплавов (место разрыва образцов по шву)**

Номер образца	Марки свариваемых сплавов	$\sigma_b$ , МПа
1	Д16+АМг6	$\frac{294...312}{308,5}$
2	Д16+1570	$\frac{302...316}{314,3}$
3	Д16+1460	$\frac{296...311}{309,2}$

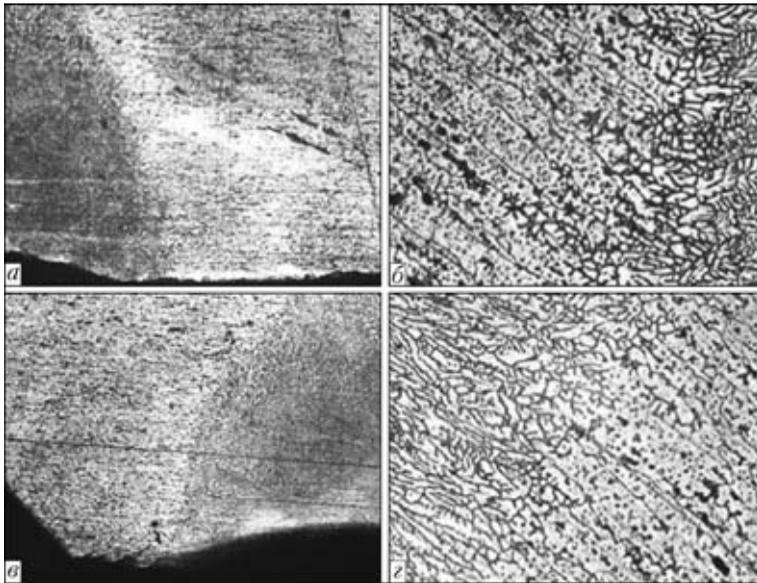


Рис. 5. Микроструктуры образцов сварных соединений сплава Д16, выполненных электронно-лучевой сваркой, после испытаний на межкристаллитную коррозию: а, б — контрольный образец; в, г — образец № 1 (а, в —  $\times 100$ ; б, г —  $\times 500$ )

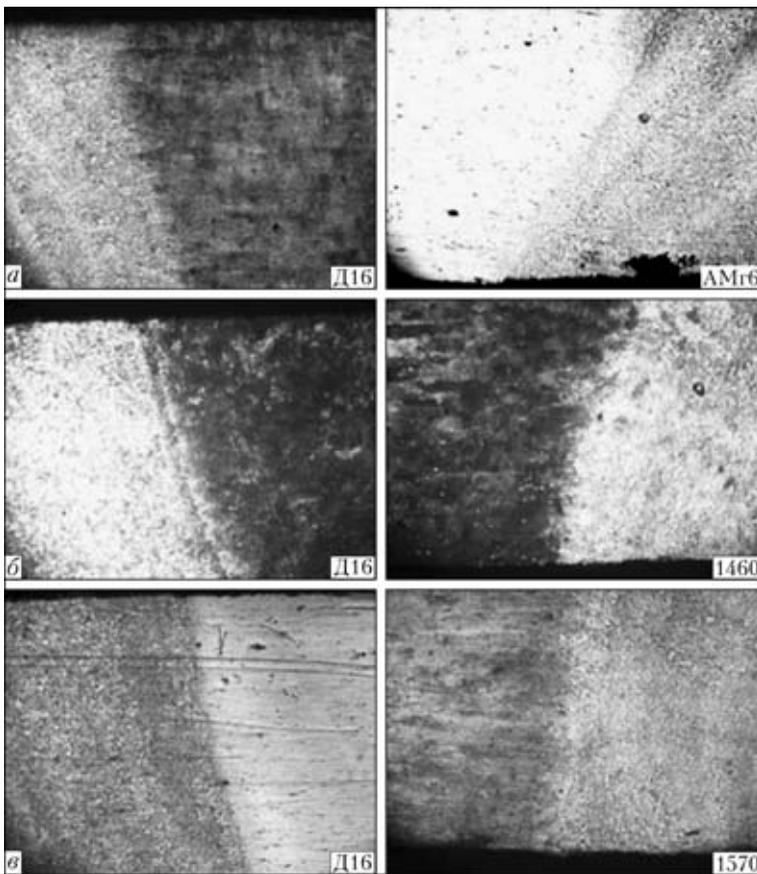


Рис. 6. Микроструктуры ( $\times 100$ ) образцов сварных соединений разноименных алюминиевых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой, после испытаний на межкристаллитную коррозию: а — сплав Д16+АМг6; б — Д16+1460; в — Д16+1570

6032–89 «Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии» на металлографическом микроскопе «Неофот-21» (с соответствия с ГОСТ

6032–82 значение глубины разрушения границ зерен должно составлять не более 30 мкм).

Предварительное визуальное обследование образцов показало, что их состояние было удовлетворительным. Результаты исследований и фотографии микроструктуры шлифов сварных образцов сплава Д16 на склонность к межкристаллитной коррозии приведены на рис. 5.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что образцы сварных соединений алюминиевого сплава Д16, выполненные электронно-лучевой сваркой, не склонны к межкристаллитной коррозии.

Исследования на склонность к межкристаллитной коррозии соединений разноименных алюминиевых сплавов Д16+АМг6; Д16+1460 и Д16+1570, выполненных электронно-лучевой сваркой, проводили по приведенной выше методике и в растворе того же состава. Сравнив глубину поражения межзеренного растравливания испытуемых образцов (по три штуки) с контрольным образцом, проводили оценку стойкости соединений к межкристаллитной коррозии.

Результаты исследований и измерений приведены на рис. 6 и в таблице.

Как следует из анализа полученных результатов исследований, все соединения разноименных алюминиевых сплавов Д16+АМг6, Д16+1460, Д16+1570, выполненные электронно-лучевой сваркой в вакууме, не склонны к межкристаллитной коррозии.

Проведенные механические испытания (таблица) показали, что временное сопротивление разрыву соединений разноименных алюминиевых сплавов находится на уровне свойств соединений одноименных алюминиевых сплавов меньшей прочности. Таким образом, в случае использования в конструкции сварного изделия алюминиевых сплавов разных марок снижения прочностных характеристик практически не произойдет.

## Выводы

1. Разработаны конструктивно-технологические решения при создании сварных объемных конструкций и стрингерных панелей повышенной жесткости с использованием тонколистовых элементов или профильного проката.

2. Установлено, что сварные соединения сплава Д16 и разноименные стыковые соединения сплавов Д16+АМг6; Д16+1460 и Д16+1570, выполненные ЭЛС, не подвержены межкристаллитной коррозии в условиях их испытаний по ГОСТ 9.021–74.

3. Результаты выполненных опытно-поисковых работ и исследований могут быть использованы при выборе материалов и вариантов соединений для дальнейших испытаний по определению характеристик усталости, вязкости разрушения, коррозии под напряжением, живучести и остаточной прочности сварных конструктивных элементов.

1. Рабкин Д. М. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов.* — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.

2. *Электронно-лучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко, А. А. Бондарев. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
3. Патон Б. Е., Бондарев А. А. Современное состояние и новые технологии электронно-лучевой сварки конструкций // *Автомат. сварка.* — 2004. — № 11. — С. 23–31.
4. *Перспективы применения сварки при создании самолетов нового поколения* / Б. Е. Патон, А. Я. Ищенко, К. А. Ющенко и др. // Там же. — 1996. — № 6. — С. 26–27.
5. Бондарев А. А., Назаренко С. В. Определение склонности алюминиевых сплавов к образованию горячих трещин при электронно-лучевой сварке // *Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении.* — Ивано, 1989. — С. 10–12.
6. *Изготовление сварных крупногабаритных тонкостенных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов* / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, В. И. Павловский и др. // *Автомат. сварка.* — 1989. — № 10. — С. 37–45.
7. Бондарев А. А., Назаренко С. В., Бондарев Анд. А. Совершенствование технологии изготовления сварных оребренных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов // *Проблемы сварки, металлургии и родственных технологий.* — Тбилиси, 1999. — С. 40–47.

Variants of improvement of the technology for fabrication of volumetric welded structures from thin-sheet elements are considered. Examples of small-size models of specific products are presented. Recommendations are given for reducing residual distortions in the thin-sheet welded structures. Variants of the welded T-joints employed in manufacture of stringer panels are shown. Resistance of the welded joints to intercrystalline corrosion is estimated.

Поступила в редакцию 10.02.2011

## НОВАЯ КНИГА

**ТИТАН: технологии, оборудование, производство:** Сб. ст. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 2011. — 324 с. — Мягкий переплет, формат 200×297 мм.

В сборнике представлены статьи, опубликованные в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2005–2010 гг., по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Авторами статей являются известные в Украине и за рубежом ученые и специалисты. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов и оборудования для производства и сварки титана.

Предназначен для широкого круга инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений.



Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка»:  
 тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84, E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
 Книга реализуется в печатном виде (доставка заказной бандеролью)  
 и в электронном виде в \*.pdf формате  
 (отправка по электронной почте с закрытием оплаты по акту выполненных работ).