



## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕРЕХОДНИКОВ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

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

Представлены новые конструкторско-технологические решения получения сварных соединений разнородных материалов алюминиевый сплав — нержавеющая сталь с применением электронно-лучевой сварки. Приведены варианты тепловых сварных соединений большой толщины, оптимальные режимы их сварки и примеры применения в конструкциях.

*Ключевые слова:* сварные конструкции, электронно-лучевая сварка, сталеалюминиевые соединения, биметаллические переходники, броневая защита, макрошлифы соединений

Одним из приоритетных направлений в развитии современного машиностроения является снижение массы конструкций и аппаратов при одновременном сохранении на высоком уровне их технических характеристик и надежности в работе. Применение различных марок сталей и алюминиевых сплавов позволяет изделию оптимально реагировать на воздействие существующих в условиях эксплуатации нагрузок, температур или агрессивных сред. При реализации современных конструктивных решений широкое применение находит сварка алюминия и его сплавов с другими металлами.

В сварных соединениях из разнородных металлов алюминий является одним из наиболее трудносвариваемых. В то же время изготовление сварных конструкций из алюминия, соединенного с другими металлами, особенно целесообразно, так как при этом можно значительно снизить массу изделия.

В настоящее время растущую потребность в надежных методах соединения разнородных металлов и сплавов испытывают многие отрасли промышленности. Разработкой и созданием переходников алюминий–сталь занимаются многие организации и специалисты. Результатом многолетних исследований явилось создание различных технологий получения, например, листового биметалла алюминий–сталь, из которого изготавливают переходники в конструкциях различного назначения (рис. 1). Наибольший объем производства биметалла приходится на металлургическую промышленность, где его получают посредством проката двух листов. Биметалл получают также взрывной обработкой, несмотря на специфичес-

кие условия реализации этого процесса, диффузионной сваркой, пайкой, сваркой трением и контактной сваркой. Однако все эти процессы ограничиваются лишь незначительными объемами получения переходников алюминий–сталь.

Все большее распространение получает и новый способ сварки высокоскоростным ударом [1]. Иногда переходниками не пользуются, а осуществляют напрямую приварку алюминиевых деталей к стальным. Однако для реализации этого процесса сварки свариваемые кромки стали должны быть заранее подвергнуты алитированию, т. е. их покрытию расплавленным алюминием посредством окунания в жидкий расплав.

В большинстве случаев применение перечисленных способов получения биметалла касается использования тонколистовых составляющих, т. е. в сумме толщина биметалла может достигать 10 мм и немного больше. Значительно труднее реализовать процесс, если потребуются переходники толщиной, например, алюминия 20 мм и более.

Еще более сложной проблемой получения биметаллических переходников является наличие на границе раздела двух металлов интерметаллидных хрупких прослоек [2, 3]. Это могут быть

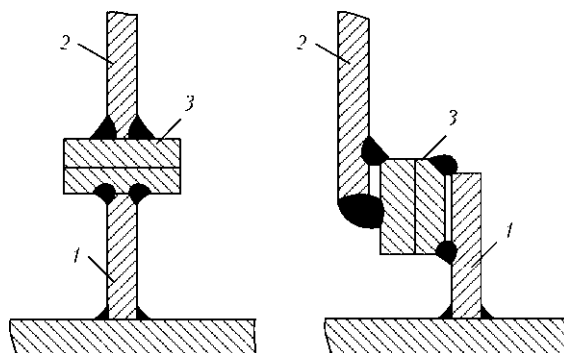


Рис. 1. Варианты типовых узлов в сварных конструкциях с использованием переходников из разнородных материалов [2]: 1 — стальной элемент конструкции; 2 — алюминиевый элемент; 3 — биметаллический переходник алюминиевый сплав — сталь

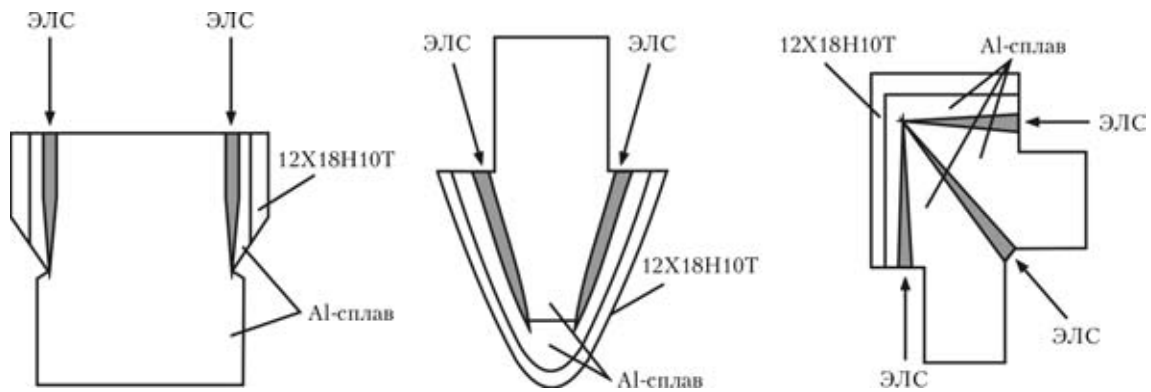


Рис. 2. Схемы сварных соединений переходников большой толщины

фазы  $FeAl$ ,  $Fe_2Al_5$ , а также постоянно присутствующие на поверхности алюминия и его сплавов оксиды и субоксиды  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O$ ,  $AlO$ .

Все эти соединения имеют высокую термостойкость и не разрушаются даже при нагреве зоны раздела до температуры  $1600\text{ }^\circ\text{C}$  и выше. Наличие такой прослойки в соединении алюминий–сталь толщиной даже  $50\text{...}100\text{ }\mu\text{m}$  существенно влияет на охрупчивание соединения, при этом прочность на отрыв снижается с  $300\text{...}350$  до  $50\text{...}100\text{ МПа}$  [2].

Использование таких биметаллических переходников в сварных конструкциях [4], когда к любому из металлов привариваются дугowymi способами другие элементы конструкции, приводит к высокотемпературному нагреву зоны перехода, что дополнительно увеличивает интерметаллидную прослойку. Кроме того, она становится менее плотной и вследствие этого теряет не только прочность, но снижается коррозионная стойкость как под действием жидкообразной, так и газовой среды.

Выходом из создавшейся ситуации может стать применение биметаллических переходников, полученных сваркой взрывом. При взрывном процессе получения биметалла в определенном диапазоне параметров скорости метания ( $2000\text{ м/с}$  и выше) на границе раздела свариваемых металлов появляются волнообразные завихрения [5, 6]. При этом благодаря увеличению ударной вязкости при поверхностных слоях металлов происходит дробление интерметаллидной прослойки на границе раздела и их локализация в отдельных участках завихрений металлов. Биметаллический переходник, полученный по такой технологии, практически не подвержен охрупчиванию и потере прочности при последующем его нагреве в сварном соединении с другими металлами.

Известен также способ сварки стали с алюминиевыми сплавами, когда не требуется применение биметаллического переходника [7]. Сварку осуществляют непосредственно оплавлением кромки алюминиевой заготовки на стальную кромку стыка, которая перед этим подвергается нанесению промежуточной пленки элементов мо-

дификаторов. При этом нанесение этих элементов осуществляется осаждением из паровой фазы в вакууме. Это могут быть титан, цирконий, никель и др. Толщина пленки обычно составляет  $5\text{...}10\text{ }\mu\text{m}$ , но она имеет непрерывную металлическую связь со сталью, а после оплавления на этой поверхности кромки алюминия элементы-модификаторы переходят в твердый раствор жидкого расплава алюминия и упрочняют его. Прочность таких соединений стали с алюминиевыми сплавами находится на уровне  $300\text{...}350\text{ МПа}$ . Несмотря на все преимущества этого способа широкое применение его ограничено из-за сложности технологического процесса и больших экономических затрат.

Поэтому при сварке изделий, когда требуется применение элементов конструкций с большой толщиной свариваемых кромок, лучшим вариантом можно считать изготовление переходников с использованием взрывной технологии. Но и в этом случае, чтобы не произошло даже частичного образования интерметаллидной сплошной прослойки по границе раздела металлов, лучшей последующей технологией соединения будет электронно-лучевая. Такое решение основывается на том, что при электронно-лучевой сварке погонная энергия на порядок ниже, чем при других способах сварки плавлением. Следовательно, в этой ситуации нагрев границы раздела при сварке будет наименьшим. А возможность сварки электронным лучом кромок большой толщины и за один проход предотвращает многократный нагрев зоны разграничения за счет наложения валиков дугowymi способами по разделке кромок.

При разработке конструкторско-технологических решений для создания переходников с боль-

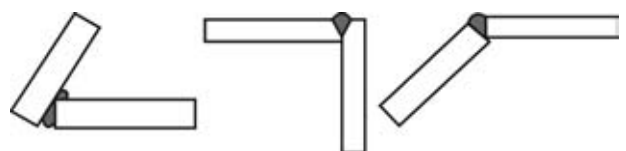


Рис. 3. Варианты типовых соединений при изготовлении переходников для высоконагруженных сварных конструкций из разнородных материалов [3]

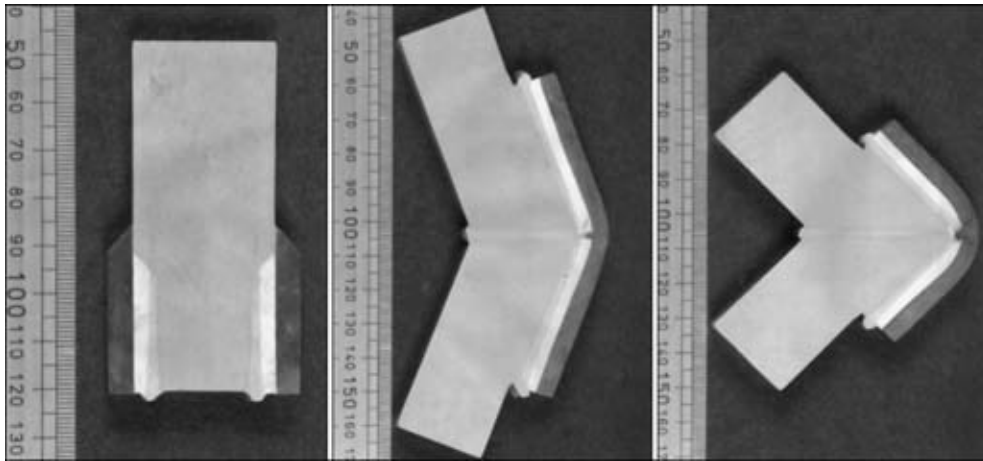


Рис. 4. Макрошлифы переходников, изготовленных по новой технологии с применением электронно-лучевой сварки

шой толщиной кромок учитывали также их последующее применение в конкретных конструкциях изделий.

На рис. 2 представлены варианты типовых переходников в конструкциях с алюминиевым корпусом и стальным обрамлением. Такие переходники могут быть использованы, например, в самолетостроении. В тяжелых транспортных самолетах вдоль фюзеляжа на полу должны размещаться износостойкие направляющие, по которым перемещаются грузы. Кроме износостойкости, эти элементы не должны увеличивать массу конструкции в целом, поэтому их целесообразнее изготавливать в биметаллическом варианте.

Другого рода проблемы возникли при создании крупногабаритных транспортных средств, изготавливаемых из алюминиевой брони в армейских подразделениях. Такие машины облегченного типа имеют широкий спрос, особенно в случае их использования на болотистых, песчаных почвах или в джунглях. На рис. 3 показаны варианты типовых сварных соединений, выполняемых в различных пространственных положениях при большой толщине свариваемых элементов. Естественно, при этом необходимо выполнять сварку многопроходными швами, что сопровождается значительным перегревом границы

раздела при использовании биметаллических переходников. И еще имеется одна проблема, которую необходимо решать при создании конструкций такого типа. Сварные соединения высокопрочных алюминиевых сплавов, в том числе и броневых плит, имеют ударную вязкость соединений почти в два раза ниже, чем у основного металла. В этом случае при локальном нагружении сварного шва, например, при попадании пули или снаряда сварной шов растрескивается на очень большую длину от места нагружения. Поэтому для обеспечения высокой конструктивной прочности таких изделий требуется стальная броневая защита сварных швов алюминиевой брони по всей длине [8]. Решение такой задачи возможно при использовании биметаллических переходников, показанных на рис. 2.

На рис. 4 приведены макрошлифы переходников с большой толщиной алюминиевых элементов, изготовление которых выполняли с использованием электронного луча в вакууме. Применяли источник питания с ускоряющим напряжением 60 кВ. Режимы сварки переходников с различной толщиной алюминиевых кромок приведены в таблице. На рис. 5 показан макрошлиф соединения при приварке переходников к стальным элементам конструкций.

Применение в сварных конструкциях принципиально новых решений использования переходников для соединения разнородных металли-

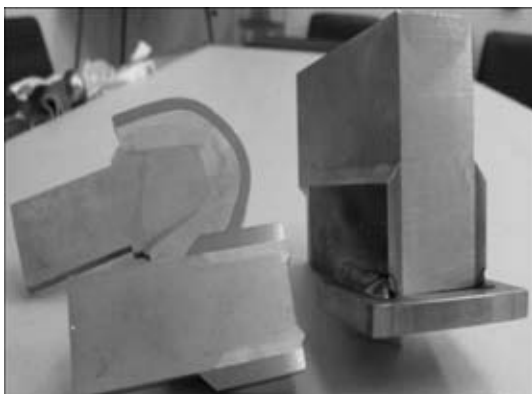


Рис. 5. Макрошлифы и внешний вид узла после приварки переходника к стальным элементам конструкции

Режимы ЭЛС биметаллических переходников из сплава Д16

Глубина проплавления, мм	Ток сварки $I_w$ , мА	Ток фокусировки $I_f$ , мА	Скорость сварки $v$ , мм/с	Амплитуда круговой развертки $A$ , мм
33	128	618	12	2
41	175	618	12	2
44	185	618	12	2
40	170	618	12	2

ческих материалов позволит во многих случаях решить проблемы, имеющие место при проектировании и изготовлении высоконагруженных изделий из легких сплавов.

### Выводы

1. Разработаны принципиально новые конструкторско-технологические решения при изготовлении сталеалюминиевых переходников применительно к созданию сварных узлов и изделий из разнородных материалов большой толщины.

2. Приведены варианты типовых узлов и соединений заготовок из алюминиевых сплавов к стальным деталям и узлам при создании сложных высоконагруженных сварных конструкций.

1. *Влияние режимов сварки взрывом на прочностные и пластические свойства сталеалюминиевых соединений /*

New design-technological solutions for production of welded joints between dissimilar aluminium alloy-stainless steel materials by electron beam welding are presented. Variants of heavy-section welded joints, optimal parameters for welding them, and examples of application in structures are given.

Поступила в редакцию 17.03.2011

## НОВАЯ КНИГА

**В. Я. Кононенко.** Подводная сварка и резка. — 2-е изд., доп. и перераб. — Киев, 2011. — 264 с.

В монографии рассмотрены особенности горения дуги, перенос металла и условия формирования соединения при сварке под водой. Сформулированы общие принципы создания покрытых электродов и самозащитных порошковых проволок для выполнения подводной сварки. Даны их механические свойства. Приведены типы сварных соединений, методика подготовки и сборки под сварку, возможные дефекты соединений и электрические параметры дугового процесса. Обобщены типичные повреждения подводных металлоконструкций и приведены технологические решения, использовавшиеся при их успешном восстановлении с помощью подводной сварки плавящимся электродом. Описано оборудование для реализации процессов мокрой и сухой подводной сварки плавящимся электродом. Изложены основные способы подводной резки. Даны их сравнительные характеристики. Приведены сравнительные данные электродных материалов. Кратко описаны примеры успешной реализации технологий подводной резки.

Рассчитана на научный и инженерно-технический персонал, занимающийся подводно-техническими работами, «продвинутых» водолазов-сварщиков, а также студентов вузов и ПТУ сварочных, металлургических и машиностроительных специальностей, мастеров, рабочих.

