



СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

(направления исследований, проводимых в ИЭС им. Е. О. Патона)

Чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Кратко освещены основные направления исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона за полстолетия в области сварки алюминиевых сплавов. Приведены примеры эффективного применения технологий дуговой сварки алюминиевых сплавов при сооружении различных конструкций.

Ключевые слова: дуговая сварка, автоматическая сварка по флюсу, сварка неплавящимся электродом, переменный ток, высокоамперная дуга, асимметричный разномерный ток, сварка плавящимся электродом, импульсно-дуговая сварка, узкощелевая сварка, алюминиевые сплавы, микролегирование скандием

Как и в других развитых странах, в Украине предполагается увеличение объемов выпуска алюминия и его высокопрочных сплавов в виде деформированных полуфабрикатов, необходимых для производства железнодорожных пассажирских вагонов, легковых и грузовых автомобилей, автобусов, самолетов, изделий ракетно-космической отрасли, химической, медицинской и пищевой промышленности, а также в строительстве.

Значительные трудности, возникающие при сварке плавлением алюминиевых сплавов, связаны с большой химической активностью компонентов, которые входят в состав сплавов. Взаимодействие с кислородом и склонность к поглощению водорода приводят к возникновению в швах грубых оксидных пленок и пористости. Наиболее прочные сплавы склонны к образованию горячих трещин и разупрочнению при сварке плавлением. Эти особенности резко проявляются при использовании новых высокоресурсных алюминево-литиевых сплавов, которые, благодаря низкой плотности и повышенному модулю жесткости, позволяют на 10...15 % уменьшить массу конструкций и соответственно повысить грузопместимость пассажирских и транспортных самолетов, других транспортных средств.

Научные исследования и инженерные разработки в области дуговой сварки алюминия и его сплавов были начаты в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в 1951 г. в лаборатории сварки цветных металлов и сплавов, перед которой была поставлена задача в сжатые сроки организовать поточное производство цистерн из сплава АМц толщиной 18...20 мм для перевозки и хранения жидкого кислорода и других химических продуктов, используемых для запуска ракет. Попытки использовать на заводе сварку в

инертных газах не дали положительных результатов, так как соединение толстолистового металла приходилось выполнять с разделкой кромок за несколько проходов.

При этом необходимы были тщательная подготовка поверхности свариваемых кромок и проволоки, использование аргона, иногда и гелия. Кроме того, оборудование для сварки в тот период было несовершенным.

Задача была решена путем разработки и внедрения в массовое производство автоматической сварки по флюсу марки АН-А1. Эта технология являлась ведущей при массовом производстве емкостей от 1 до 100 м³ на заводах «Большевик» (г. Киев), «Красный Октябрь» (г. Фастов), Сумском машиностроительном и ряде других предприятий, котлов железнодорожных цистерн на Мариупольском ПО «Азовмаш». Котлы и емкости предназначались для хранения и транспортировки пищевых и химических продуктов — воды, молока, азотной кислоты, ракетного топлива и др.

В 1960–1970-х годах началось активное применение алюминиевых сплавов повышенной прочности в производстве ракетно-космической техники, судо-, танко- и вагоностроении, химической промышленности, строительстве и других отраслях. Сварка по флюсу таких объектов не обеспечивала требуемого качества швов и необходимые свойства соединений. При сварке металла толщиной свыше 15 мм увеличивалась опасность образования шлаковых включений и пор в швах, а также возрастали требования к соблюдению санитарно-гигиенических условий труда. Указанные обстоятельства обусловили интенсивную разработку более эффективных способов и технологий сварки в инертных газах и электронным лучом. Работы в этом направлении велись параллельно, что позволило гибко выбирать различные варианты технологии в зависимости от требований к изделиям, условиям производства и эксплуатации.

Среди способов сварки в инертных газах алюминиевых сплавов в начале 1960-х годов ведущее положение занимала аргонодуговая сварка неп-



лавящимся электродом переменным током синусоидальной формы, которая обеспечивала более высокие качество металла шва и механические свойства соединений по сравнению со сваркой плавящимся электродом в аргоне. Что касается проплавляющей способности дуги, то она ограничивалась недостаточной стойкостью электродов из наиболее стойкого в то время торированного вольфрама. Поэтому были созданы вольфрамовые электроды с присадкой до 1,5...2 % оксида лантана (ЭВЛ) и с 3,0...3,5 % оксида иттрия (ЭВИ). В отличие от торированных они являются радиационно безопасными.

Иттрированные электроды позволили увеличить плотность мощности столба дуги в 1,5...2,0 раза без опасного перегрева электродов, добиться существенного повышения эффективности плавления свариваемого металла. С помощью иттрированных электродов диаметром 10 мм появилась возможность сваривать за один проход однофазной высокоамперной дугой (до 900...1000 А) алюминиевые сплавы толщиной до 20 мм, а трехфазной дугой — 30...40 мм. Разработанное при этом соответствующее сварочное оборудование способствовало расширению области использования сварки неплавящимся электродом. Уже к середине 1960-х годов технология автоматической сварки высокоамперной дугой корпусных изделий ракетносителей из сплава АМгб осваивается на предприятиях, конструкторских бюро С. П. Королева, В. П. Челомея, М. К. Янгеля.

Промышленный опыт изготовления конструкций ответственного назначения из сплава АМгб показал, что, несмотря на строгое соблюдение требований к подготовке металла и технологии сварки неплавящимся электродом, в швах встречались недопустимые включения оксидной пленки. Идея интенсификации перемешивания металла сварочной ванны с целью измельчения оксидных включений и одновременно его дегазации была реализована при сварке неплавящимся электродом пульсирующей дугой. Дальнейшие исследования позволили установить эффективность способа и создать специализированное оборудование. При этом удалось уменьшить в 3 раза относительную протяженность включений оксидной пленки в сварных швах сплава АМгб и вероятность образования ее протяженных включений при сварке литийсодержащих сплавов 1420 и 1460. Резкие изменения амплитуды в период импульса и паузы (модулированный ток) обеспечили снижение в 7...10 раз суммарного объема пустот в сварных соединениях сплавов.

В то же время была установлена более высокая эффективность применения асимметричного разнополярного тока прямоугольной формы для дуговой и плазменной сварки. Благодаря сокращению времени протекания тока обратной поляр-

ности до 10...30 % общего цикла снижается нагрузка на вольфрамовый электрод, а в периоды прямой полярности достигается более глубокое проплавление основного металла. В результате была повышена скорость сварки, снижен показатель погонной энергии, уменьшена масса и габариты плазматрона.

Исследования физических явлений, происходящих в дуге, позволили достичь более высокой концентрации тепловой энергии при гелиево-дуговой сварке постоянным током по сравнению со сваркой вольфрамовым электродом переменным током в аргоне. Это способствовало повышению проплавляющей способности дуги, снижению в 1,5...2,0 раза погонной энергии и соответственно уменьшению зоны термического влияния.

В дальнейшем было показано, что дуговой способ сварки плавящимся электродом по сравнению со сваркой неплавящимся электродом оказался менее чувствительным к размерам зазора и превышению толщин соединяемого металла, обеспечил более высокую скорость сварки и меньший уровень остаточных деформаций сварных узлов. Однако нестабильное качество швов, получаемых при сварке стационарной дугой в аргоне, ограничивало применение ее в производстве ответственных конструкций. Разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона новые способы сварки и оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом явились значительным достижением в области сварки плавлением. Технологические исследования процесса сварки с использованием генераторов импульсного тока позволили повысить стабильность горения дуги, значительно уменьшить разбрызгивание металла и испарение легколетучих элементов, снизить количество и размеры оксидных включений и пор в швах.

Благодаря этому со середины 1960-х годов импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом находит все более широкое применение в промышленности, в частности, при изготовлении компонентов ракетно-космических комплексов на предприятиях НПО «Энергия», корпусов легких десантируемых бронемашин на Волгоградском заводе и бронемашин пехоты на Курганском машиностроительном заводе, пассажирских железнодорожных вагонов и вагонов метро, самосвалных платформ автомобилей, автомобильных рефрижераторов, надстроек судов, строительных конструкций и других изделий.

Высокие требования, предъявляемые к сварным соединениям емкостей из сплава АМцС и технического алюминия для хранения и перевозки агрессивных продуктов, потребовали разработки в ИЭС им. Е. О. Патона высокопроизводительной технологии сварки плавящимся электродом большого диаметра (3...4 мм) стационарной дугой в



смеси инертных газов — гелия и аргона. Использование этих смесей позволило не только уменьшить в 2...8 раз объем микропустот в наплавленном металле, повысить механические свойства и коррозионную стойкость сварных соединений, но и увеличить на 40...60 % производительность процесса сварки. Такая технология была успешно реализована при изготовлении емкостей на Балашихинском ПО «Криогенмаш», в поточном производстве алюминиевых котлов железнодорожных цистерн на ПО «Азовмаш».

Использование импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом диаметром 1...1,6 мм в смесях газов гелия и аргона позволило получить более высокий уровень механических свойств тонколистовых соединений алюминий-литиевых сплавов по сравнению со сваркой неплавящимся электродом пульсирующим током. Процесс нашел широкое применение в производстве шпангоутов ракет и корпусов боевых машин пехоты на Курганском машиностроительном заводе. Для сварки плавящимся электродом в ИЭС им. Е. О. Патона разработано семь типов сварочных установок, тракторов, автоматов.

Для соединения толстостенных конструкций (до 150 мм) разработана технология узкощелевой сварки импульсной и стационарной дугой плавящимся электродом в гелии и его смесях с аргоном. Способ позволил получить доброкачественные соединения в нижнем положении и на вертикальной плоскости, а также сократить в несколько раз количество сварочных проходов, уменьшить зону термического влияния и уровень остаточных деформаций, сэкономить сварочные материалы и электроэнергию.

Отмеченные преимущества новых технологий также привели к широкому внедрению их в производство изделий аэрокосмической техники из алюминиевых сплавов АМг6, 1201, 1420, в том числе комплекса «Энергия-Буран», ракет-носителей и космической орбитальной техники.

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) отличается уникальным сочетанием особенностей: высокой плотностью энергии в пучке малого диаметра, надежной защитой зоны сварки и рафинирующим воздействием вакуумной среды, возможностью достижения очень высоких скоростей кристаллизации жидкого металла. С применением ЭЛС изготавливаются самые ответственные и высоконагруженные детали и узлы, работающие в условиях космического вакуума, знакопеременных нагрузок и весьма низких температур. В промышленных условиях освоена ЭЛС разнообразных деталей и узлов: от миниатюрных до крупногабаритных, толщиной от десятых долей миллиметра до 200 мм. В отдельных случаях реализована сварка заготовок толщиной до 400...600 мм. Для осуществления ЭЛС созданы установки, объем ваку-

умных камер которых составляет от нескольких кубических дециметров до 1500 м³. При сварке крупногабаритных конструкций суммарная протяженность сварных швов достигает 100...150 м.

Расширению внедрения этого способа сварки способствует создание установок, позволяющих работать в условиях локального или низкого вакуума. Разработано автоматическое управление процессом сварки, позволяющее получать высококачественные сварные соединения. Для достижения этого используют также систему программирования тепловложения для различных участков объема сварочной ванны. Использование сканирования пучка и запрограммированного тепловложения в сочетании с подачей присадочной проволоки позволяют снизить требования к точности сборки стыка без потери качества формирования швов при зазорах до 3,0 мм (толщина заготовок 50...100 мм).

Хорошие результаты обеспечивает ЭЛС при изготовлении стрингерных панелей из тонколистового материала. Приварка ребер к оболочке толщиной 2...3 мм выполняется двумя угловыми швами, одним угловым швом с одной стороны или прорезным швом. Во всех случаях швы можно сформировать без применения присадки.

Лазерная сварка позволяет получить подобные тонкостенные конструкции без использования вакуумируемых камер. При этом открывается возможность сваривать любые крупногабаритные конструкции. Способ сварки характеризуется высокой удельной плотностью энергии и позволяет вести сварку с большой скоростью, но с малым тепловложением. Это способствует снижению уровня остаточных деформаций и напряжений в изделиях, а также повышению прочности сварных соединений на 10...15 % по сравнению с аргонодуговой сваркой. Уверенность в более широком применении этого способа сварки основана как на результатах интенсивного освоения техники и технологии сварки этим способом, так и на успешном комплексном использовании процессов лазерной и дуговой сварки. Такие гибридные технологии позволяют объединить преимущества двух разных способов сварки в одном, что делает его более эффективным и экономичным.

Альтернативным по отношению к перечисленным, наиболее широкоиспользуемым способам сварки плавлением, следует считать соединение в твердом состоянии без расплавления основного материала, например, способом трения с перемешиванием. Использование такой технологии соединения позволяет исключить перегрев сплавов и вместе с тем обеспечивает пластическую деформацию металла шва. Это благоприятно отражается на уровне механических свойств соединений и исключает некоторые рассмотренные



проблемы сварки плавлением высокопрочных алюминиевых сплавов.

Разработка ВИАМом высокопрочных алюминиевых сплавов различных систем легирования (Al–Mg, Al–Cu, Al–Zn–Mg–Cu) и особенно нового класса сверхлегких алюминий-литиевых сплавов, которыми занимался академик И. Н. Фридляндер с сотрудниками, послужила фундаментом многолетнего творческого контакта между ИЭС им. Е. О. Патона и ВИАМ. Следствием такого сотрудничества явилось успешное решение проблем свариваемости и внедрение новых материалов в производство авиационной, ракетной и космической техники. Эффективность сварных конструкций, например, топливного бака и кабины пилота из алюминий-литиевого сплава типа 1420, подтверждена созданием и многолетней эксплуатацией сверхзвуковых истребителей серии МиГ-29.

В 1990-е годы совместно с ВИАМом и ВИСом, его руководителями академиком А. Ф. Беловым и чл.-кором РАН В. И. Добаткиным были выполнены важнейшие исследования, направленные на улучшение характеристик перспективных легких сплавов. Созданы также специальные сварочные материалы (присадки) на основе Al–Mg и Al–Cu сплавов, которые содержат до 0,5 % скандия. Благодаря этому целый ряд высокопрочных трудносвариваемых сплавов стал удовлетворительно соединяться, а прочность швов возросла на 10...15 %. Более значительный эффект получен при легировании скандием не только присадок, но и основного металла полуфабрикатов на уровне 0,1...0,2 %.

В настоящее время под руководством Б. Е. Патона учеными и специалистами института выполняются фундаментальные исследования в области сварки легких металлов и сплавов по следующим направлениям:

- изучение явлений, происходящих в зоне сварки при взаимодействии компонентов легких сплавов и композиционных материалов с плазмой дуги, электронным и лазерным пучками, обоснование условий доброкачественного формирования сварных соединений;

- определение характеристик свариваемости новых алюминиевых сплавов различных систем легирования и поиск способов преодоления склонности их к образованию горячих трещин и

пористости при сварке плавлением и в твердой фазе;

- изыскание методов соединения разнородных материалов;

- исследование закономерностей первичной кристаллизации и механизмы формирования структуры швов в неравновесных условиях при больших скоростях охлаждения, прерывистых и импульсных подачах энергии, а также под влиянием микродобавок различных модификаторов структуры;

- исследование микроструктурных превращений в зоне сварки алюминиевых сплавов и их влияние на физико-механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов различных систем легирования;

- определение влияния эксплуатационных факторов, а именно температуры в широком диапазоне от 4 до 60 К, агрессивных сред, характера напряженного состояния, наличия концентраторов напряжения, химической и физической неоднородности сварных соединений, на работоспособность и долговечность конструкций из легких сплавов;

- разработка новых технологий неразъемного соединения перспективных конструкционных материалов на основе алюминия, включая дисперсные алюмокомпозиты, интерметаллиды и разнородные материалы, которые трудно соединяются при обычных способах сварки плавлением;

- обоснование критериев надежной эксплуатации сварных конструкций ответственного назначения в различных условиях с учетом их структурной и химической неоднородности.

Значительным достижением начавшегося третьего тысячелетия являются разработки наноструктурных материалов с исключительно высокими свойствами и нанотехнологий неразъемного соединения в твердой фазе трудносвариваемых материалов таких, как интерметаллиды. Они построены на базе алюминия, титана, никеля и нанодисперсных композиционных систем. Для этого создан новый класс эффективных наноструктурных материалов в форме многослойных плен и тонких фольг, получаемых с использованием электроннолучевой парофазной технологии и других методов тонкого диспергирования.

The main directions of investigations conducted at the E. O. Paton Electric Welding Institute over half a century in the field of arc welding of aluminium alloys are outlined. Examples of an effective application of technologies of arc welding of aluminium alloys in fabrication of various structures are given.

Поступила в редакцию 18.08.2007