

**З архіву  
наукових праць  
та виступів Б.Є. Патона**

---

---

**Б. Е. Патон**

Институт электросварки им. Е. О. Патона  
Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

## **СВАРКА В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Освоение человеком космического пространства дало мощный толчок развитию науки и техники, созданию самых современных технологий, среди которых важное место занимают сварочные. В настоящее время невозможно представить себе изготовление космических аппаратов без применения сварки и других родственных технологий. Космическая промышленность предъявляет к ним все более высокие требования. Это объясняется широким использованием новых конструкционных материалов, непрерывным возрастанием требований к качеству соединений, усложнением условий их эксплуатации. Такая ситуация побуждает специалистов-сварщиков постоянно совершенствовать существующие технологии, разрабатывать новые, создавать и конструировать уникальное сварочное оборудование. В результате уровень сварочного производства в ракетно-космической промышленности является одним из самых высоких по сравнению с другими отраслями.

В производстве сварных конструкций ракетно-космических комплексов сосредоточены многие виды сварочных процессов. Особенности некоторых из них целесообразно рассмотреть на примере изготовления топливных баков из алюминиевых сплавов.

Способы дуговой сварки, применяемые при производстве топливных баков из алюминиевых сплавов, усовершенствованы за счет следующих новых решений:

- использование более стойких вольфрамовых электродов с активирующими добавками оксидов редкоземельных элементов;

- применение источников питания переменного тока с синусоидальной и прямоугольной формой волны, которая позволяет вести сварку пульсирующей дугой, а также в режиме асимметрии, когда длительность периодов тока при прямой полярности в 2—4 раза превышает длительность периодов тока при обратной полярности;

- использование гелия при сварке вольфрамовым электродом на постоянном токе при прямой полярности и системы управления, стабилизирующей режим сварки;

- применение гелия и импульсных источников тока для сварки плавящимся электродом;

- применение оригинальной сварочной оснастки, обеспечивающей стабильные условия сборки крупногабаритных изделий, минимальные перемещения в процессе изготовления и предотвращение сварочных деформаций.

Большой объем сварочных работ при изготовлении емкостей выполняется методом многопроходной импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в среде гелия (диаметр электрода составляет 2.0...2.5 мм, основной сварочный ток — до 260 А, частота импульсов — до 200 Гц, скорость сварки — до 60 м/ч). Высокая скорость сварки позволяет уменьшить зону разупрочнения металла и сварочные деформации. При сварке горизонтальных швов на вертикальной плоскости процесс осуществляется в режиме последовательной наплавки небольших валиков в узкую щелевую разделку. Этим способом свариваются различные виды соединений (включая замкнутые) на заготовках любой толщины. Ши-

рокое распространение находит сварка вольфрамовым электродом постоянным током (прямая полярность) в среде гелия.

Применяется плазменная сварка переменным током. Вначале она использовалась для соединения тонкого металла толщиной 0.2...1.0 мм (микроплазменная сварка). В настоящее время этот способ сварки применяется и для заготовок толщиной до 10...15 мм благодаря использованию источников асимметричного разнополярного тока с прямоугольной формой волны и надежных плазмотронов.

Освоение производства мощных энергоносителей потребовало использования в крупногабаритных конструкциях, в частности в баках, профилей сложного профиля, изготавливаемых из высокопрочных алюминиевых сплавов. Первые образцы шпангоутов, используемых в топливных баках, выполнялись из крупногабаритных поковок. При их обработке до 95 % металла уходило в отходы, кроме того, не удавалось гарантировать стабильность механических свойств по всему сечению кольцевых заготовок.

Южный машиностроительный завод (ЮМЗ) уже в середине 1960-х гг. освоил выпуск сварных шпангоутов, изготавливаемых из прессованных алюминиевых профилей без последующей механической обработки. Впервые в мировой практике при активном участии В.Ф. Уткина для изготовления шпангоутов большого сечения использована контактная стыковая сварка (КСС). Технология и системы управления процессом сварки были разработаны в ИЭС. В основу технологии положен новый способ КСС непрерывным оплавлением с программным управлением основными параметрами, обеспечивающий высококонцентрированный и стабильный нагрев торцов свариваемых деталей, имеющих сложную форму поперечного сечения. Формирование соединений происходит в твердой фазе при интенсивной локальной деформации металла в ЗТВ. Благодаря этому при сварке разупрочняющихся материалов обеспечиваются механические свойства, близкие аналогичным показателям основного металла.

На базе технологии ИЭС совместно с ЮМЗ разработано и изготовлено несколько поколе-

ний специализированных машин для сварки кольцевых заготовок из алюминиевых сплавов различного сечения, которые в рекордно сжатые сроки (за 1—2 года) были внедрены в производство. Выполнен также большой объем работ по сертификации новой технологии к условиям производства, полной автоматизации процесса сварки и созданию эффективной системы контроля качества сварных соединений. Наряду с разрушающими видами контроля, разработан и эффективно внедрен метод операционного контроля, базирующийся на регистрации возможных отклонений параметров, определяющих режимы сварки. Такая система впоследствии была использована также для контроля качества других соединений, выполненных КСС (трубы, рельсы, строительные конструкции), и успешно используется в настоящее время как в странах СНГ, так и за рубежом.

Многолетний опыт применения КСС шпангоутов свидетельствует о высоком и стабильном качестве сварных соединений. В производственных условиях гарантируются коэффициент прочности сварных соединений не ниже 0.95, абсолютная газоплотность сварных швов и высокая коррозионная стойкость, близкая к показателям основного металла. Технология контактной сварки оплавлением кольцевых заготовок из алюминиевых сплавов принята как базовая на ведущих заводах отрасли. Таким способом, кроме кольцевых заготовок, сваривают и другие узлы, в частности продольные швы обечаек, стрингеры из разнородных алюминиевых сплавов, производят стыковку профилей сложного сечения. В последние десятилетия созданы уникальные комплексы для сварки шпангоутов с площадью поперечного сечения до 60000 мм<sup>2</sup>, которые успешно внедрены на ЮМЗ и РКК «Энергия», а также комплекс для сварки продольных швов обечаек топливных баков длиной до 2.2 м с толщиной стенки до 45 мм. Использование КСС при производстве мощных ракет-носителей позволило снизить их массу, повысить надежность и увеличить, полезную массу, выводимую на орбиту при той же мощности ракеты-носителя.

В последнее время ИЭС совместно с ЮМЗ проводится разработка технологий сварки но-

вых поколений высокопрочных алюминиевых сплавов, в частности систем Al-Cu и Al-Zn-Mg, дополнительно легированных литием, кадмием, скандием. Преимущества методов сварки в твердой фазе таких сплавов, относящихся трудносвариваемым, как показывают предварительные исследования, особенно проявляются при соединении разупрочняющихся материалов.

Широко применяется в ракетно-космической промышленности электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Она выполняется в камерах общего или локального вакуумирования для соединения элементов конструкций различной толщины, начиная от 0,5 мм и включая шпангоуты компактных сечений толщиной до 200 мм, продольные швы оболочек из плит толщиной свыше 40 мм. Создана сварочная пушка мощностью до 120 кВт и высоковольтный источник питания, устойчиво работающие в напряженных условиях эксплуатации и исключающие возможность развития в ускоряющем промежутке электрических разрядов и пробоев. Разработана технология ЭЛС кольцевых швов толстостенных оболочек. При этом успешно решена проблема замыкания кольцевых швов путем прецизионного микропроцессорного управления параметрами пучка электронов как на участке полного проплавления, так и на участке вывода.

Отработаны технологии ЭЛС, обеспечивающие оптимальную форму и размеры зоны проплавления. При параллельных границах зоны проплавления обеспечивается минимальный разброс показателей механических свойств соединений по толщине образцов, практическое отсутствие угловых деформаций и сравнительно невысокий уровень остаточных сварочных напряжений. Для решения этой задачи, наряду с получившей распространение сваркой сканирующим пучком, используют и другие технологические приемы, например сварку с программированием тепловложения, сканирование пучка с преломлением траектории на двух уровнях, сварку на повышенных скоростях со сквозным проплавлением металла в стыке при завышенной мощности электронного пучка.

Разработанные технологии и техника сварки алюминия, титана, ниобия, молибдена и других

металлов и сплавов позволили существенно увеличить качество, плотность, значения прочностных характеристик, соединений, уменьшить уровень остаточных сварочных деформаций, увеличить работоспособность и надежность конструкции, изготавливаемых из этих материалов.

Получение высококачественных сварных соединений из разнородных материалов обеспечивает сварка с применением энергии взрыва. Она успешно используется для получения би- и триметаллических деталей, сочетающих в себе алюминиевые сплавы различных систем легирования или разнородные материалы, например, алюминий—сталь, медь—сталь и другие сочетания металлов. Так, ИЭС и КБ «Южное» разработали технологию и обеспечили серийное изготовление сваркой взрывом плоских кольцевых переходников сталь-12X18H10T+технический алюминий АД1+сплав АМг6. Толщина слоев 10+2+10 мм, внутренний диаметр кольца 1000 мм, наружный диаметр 1600 мм. Испытания на герметичность, определяемую гелиевым течеискателем, зоны соединения в кольцевом переходнике после окончательной механической обработки показали, что герметичное сцепление слоев достигается по всему периметру изделия.

Применение этого метода сварки эффективно для ремонта оболочек в случае их механического повреждения при технологических транспортировках и при монтаже. Приварка накладок (заплат) осуществляется непосредственно в месте нахождения емкости для устранения повреждений в виде утонения полотнища или сквозных отверстий. При этом обеспечивается полная герметизация и равнопрочность участка, подвергнувшегося ремонту. Такая технология была успешно применена для восстановления жидкостного бака ракетно-космической системы «Энергия—Буран».

Для локализации действия взрыва при сварке с его применением создана взрывная камера принципиально новой трубчатой конструкции. Она представляет собой перфорированную полусферическую оболочку, к отверстиям которой приварены отрезки труб с заглушенными наружными концами, оси которых сходятся в центре полусферы. Благодаря тому что при взрыве за-

ряда ВВ ударная волна и газообразные продукты детонации дробятся на части, количество которых равно количеству труб, трубчатая камера способна выдерживать взрыв в 10...15 раз большего заряда ВВ по сравнению с камерами обычной цилиндрической или сферической конструкции.

Энергия взрыва также успешно используется для резки металлоконструкций. В ИЭС разработана большая номенклатура сосредоточенных и удлиненных кумулятивных зарядов для резки металлоконструкций объектов ракетно-космической техники и освоено промышленное производство таких зарядов. Для резки конструкций сложной конфигурации и вырезки в них отверстий с исключением отрицательного воздействия взрыва используются линейные устройства разделения с деформируемой металлической оболочкой.

В ракетно-космической промышленности все интенсивнее используются и другие методы соединения материалов без расплавления. Технологии пайки применяются для изготовления конструкций сложного профиля, таких как теплообменники, слоистые панели, патрубки трубопроводов и т. п. Изготавливаются такие конструкции из высокопрочных сталей, алюминиевых и титановых сплавов.

Большие возможности предоставляют разработанные в ИЭС технология и оборудование для магнитно-импульсной сварки разнородных цилиндрических деталей, которая проводится в твердой фазе без изменения, структуры металла в сварном шве. Принцип сварки основан на использовании потенциальной энергии конденсаторной батареи и превращении ее в кинетическую энергию движения и соударения свариваемых деталей. С помощью этого метода свариваются все виды сталей с алюминием и его сплавами, медь с алюминием и со сталью, пластмассы с металлами. Сварные соединения отличаются механической прочностью, герметичностью и вакуумной плотностью.

Решены задачи регулирования сварочных напряжений и деформаций в конструкциях ракетно-космической техники, требующих высокой точности изготовления и надежности в эксплуатации. Наиболее значительные результаты при

решении таких задач в случаях сварки листовых и оболочечных конструкций удалось достигнуть путем создания при сборке предварительных напряженно-деформированных состояний, оптимизированных по отношению к сварочным напряжениям и деформациям. Для всех типов сварных соединений разработаны схемы предварительного упругого деформирования, позволяющие устранять остаточные сварочные деформации. Так, для устранения прогибов от сварки круговых соединений в тонколистовых оболочечных конструкциях применен предварительный упругий выгиб околосшовной зоны. Для этих целей созданы специальные сборочно-сварочные агрегаты.

Разработана бездеформационная технология изготовления тонкостенных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов с применением электронно-лучевой сварки и предварительного упругого растяжения листа и ребер. Панели предназначены для использования в ракетно-космической технике и других отраслях промышленности.

Решена и такая сложная задача, как создание крупногабаритных сварных стрингерных оболочек без использования панелей на силовом стенде для приварки продольных ребер жесткости к крупногабаритной обечайке. Как обечайка, так и привариваемые ребра жесткости подвергались перед сваркой предварительному упругому растяжению. Применялась электронно-лучевая сварка аналогично процессу изготовления панелей. По этой технологии были сварены из алюминиевого сплава АМг6НН стрингерные цилиндрические оболочки диаметром 4 м и длиной 2,5 м с 72 продольными ребрами жесткости. Сварные оболочки отвечали высоким требованиям к качеству и точности изготовления.

Значительные успехи достигнуты в разработке эффективных методов определения остаточных напряжений. Так, разработан голографический метод измерений остаточных напряжений. В этом методе источником информации о напряженном состоянии служат интерференционные картины полос вокруг небольшого высверленного отверстия (радиусом 1 мм). При этом оси симметрии полученной интерференционной

картины являются направлениями главных напряжений, а порядки полос или их градиенты дают возможность выполнять количественную оценку напряжений. Для исследования остаточных напряжений в сварных конструкциях разработан переносной голографический прибор, позволяющий осуществлять измерения в лабораторных и производственных условиях без виброизоляции исследуемого объекта.

Голографическая интерферометрия предоставляет широкие возможности для неразрушающего контроля качества сварных соединений и диагностики сварных конструкций. Дефекты проявляются в виде локальных особенностей на интерференционных картинах полос. Выполненные эксперименты показали возможность использования разработанного в ИЭС голографического метода, основанного на применении портативных голографических устройств, для неразрушающего контроля качества сварных соединений непосредственно в условиях космоса.

Создание систем диагностики несущей способности сварных конструкций ракетно-космической техники как на стадиях их изготовления, так и эксплуатации приобретает все большее значение. Широкие возможности в этом отношении предоставляет метод акустической эмиссии. Разработаны специализированные методики и оборудование на основе использования эффекта акустической эмиссии, возникающей при деформировании и разрушении материалов. Так, для оценки качества изготовления сварных топливных баков в КБ «Южное» была создана система технической диагностики ИИС-2 с 64 акустическими каналами, которые могут про-

слушивать и анализировать деформирование материала баков и на ранних стадиях давать оценку процессам предразрушения. Эта система позволяет осуществлять локацию ослабленных зон и определять разрушающие давления на ранних стадиях нагружения.

Созданы не имеющие аналогов в мировой практике сварные оболочечные конструкции преобразуемого объема. Для преобразования наиболее эффективны конические поверхности. Тонкостенный конус, сваренный из лепестков, укладывается за счет изометрического преобразования поверхности в диск, толщина которого определяется размером гофров. Такие диски могут соединяться в пакет путем сварки по их внутреннему и наружному диаметрам. В заданный момент времени такая конструкция под действием сжатого воздуха быстро трансформируется в оболочечную конструкцию с объемами, увеличенными в десятки раз. Трансформируемые конструкции были использованы для создания обтекателей ракет. Они могут быть применены также для создания модулей, шлюзов, переходных отсеков, складов при строительстве и эксплуатации долговременных орбитальных станций.

В разработке уникальных сварных конструкций в ракетно-космическом комплексе огромная роль принадлежит Владимиру Федоровичу Уткину. Его всегда отличал оригинальный подход к их созданию, смелые инженерные решения. Мы дружно работали с Владимиром Федоровичем в бытность его Генеральным конструктором КБ «Южное» и всегда с признательностью вспоминаем это творческое сотрудничество.