

## ТРУДНЫЙ ПУТЬ ЛЕГКОГО МЕТАЛЛА В РАКЕТОСТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА

*А.Н. Корниенко*

*В течение 1950–70-х гг. способы сварки, основанные на дуговых процессах, заняли лидирующее положение в производстве ракетно-космической техники. Однако продолжался процесс улучшения эксплуатационных качеств алюминиевых сплавов. В основном повышение прочности достигалось нагартовкой и термической обработкой, поэтому задача сужения зоны термического влияния оставалась актуальной. На пути эволюции сварки плавлением появляется более концентрированный источник энергии — электронный луч, который по своей удельной энергетической мощности превосходит дуговые процессы, а выполнение сварки в вакууме позволяет сохранить исходную чистоту свариваемого металла.*

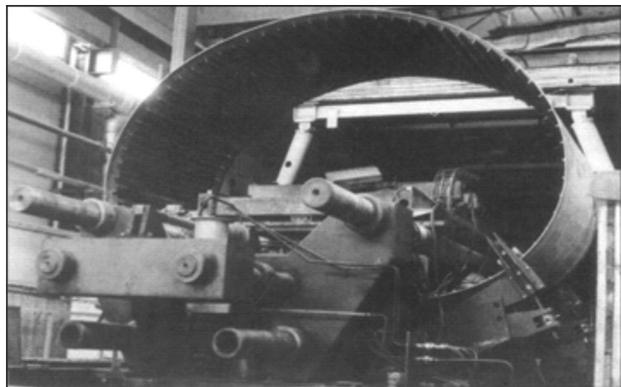
Перед создателями ракетно-космических аппаратов, судов и других транспортных средств всегда стоит задача уменьшения массы конструкции и увеличения ее прочности. Устранить это противоречие можно, используя новые материалы с более высокой удельной прочностью.

В ВИАМ, НИАТ, ВИЛС, ИЭС им. Е.О. Патона и ряде других организаций разрабатывались новые высокопрочные алюминиевые сплавы систем легирования Al – Zn – Mg и Al – Cu – Mn: 1915, Д20, Д21, 1201. Важным фактором повышения прочности стало применение нового класса алюминиевых сплавов с цирконием, скандием, литием: термически неупрочняемых сплавов

типа 1515, 1523, 1570 (Al – Mg – Sc) с высокими показателями прочности, коррозионной стойкости и термически упрочняемых типа 1970, 1975 (Al – Zn – Mg – Sc) и 1421, 1423 (Vg – Li – Sc). Одновременно И.Н. Фридляндер, Д.М. Рабкин, А.В. Лозовская и другие решали проблемы их свариваемости. Однако, как правило, с добавкой в сплав компонентов, повышающих прочность, жаро- и/или криогеностойкость, свариваемость ухудшалась. Максимальное уменьшение зоны термического влияния было необходимо как для сохранения эксплуатационных характеристик термически упрочненных алюминиевых сплавов, так и для уменьшения напряжений и деформаций сварных конструкций. Понятно, что при отклонении от проектной геометрии конструкции точность попадания ракеты в цель не гарантируется.

Технологии, основанные на дуговых процессах, еще продолжали совершенствоваться (см. №№ 6/2011 и 1/2012), но сварщики уже понимали, что электронно-лучевые процессы перспективнее. Создание электронно-лучевой сварки (ЭЛС) началось с нуля, когда уже было налажено производство ракет-носителей первых поколений.

Период от открытия электронного луча английским физиком У.Р. Гроувом в 1852 г. до момента его использования для сварки металлов растянулся на сотню лет. В 1957 г. во Франции (Д.А. Стор), а в следующем году в США (В.Л. Вимен) и Германии (К.Х. Штейгервальд) занялись разра-



*Пояс топливного бака ракеты диаметром 4 м и длиной 2,5 м со стрингерами, сваренными электронным лучом в камере КЛ 113*

боткой ЭЛС. В СССР разворачивались такие же исследования, в первую очередь, с целью использования вакуума для обеспечения «чистых условий» в зоне сварки. В 1957 г. в Московском энергетическом институте (МЭИ) Н.А. Ольшанским и Н.Г. Сушкиным были получены первые швы. В 1958 г. в ИЭС им. Е.О. Патона положительных результатов добились Б.А. Мовчан, Д.М. Рабкин, С.М. Гуревич и С.Д. Загребенюк. Исследовали характеристики электронных лучей, определяли возможность формирования мощных лучей и прецизионной сварки остросфокусированными лучами (Г.С. Крыштаб, О.К. Назаренко, В.Е. Локшин и др.), изучали особенности работы высоковольтных источников питания, систем стабилизации режима сварки и управление лучом (В.Д. Шелягин, Ю.М. Ланкин и др.).

Создание ЭЛС продвигалось быстрыми темпами. Одним из основных заказчиков новых высоких технологий были ракетчики. Соответствующее Постановление Совета Министров СССР №1210 вышло 7.12.1963 г., а уже 27.02.1964 г. директор ИЭС поручил «разработать крупногабаритную аппаратуру с выводом электронного пучка в атмосферу в соответствии с техзаданием п/я1000 и п/я186» (С.П. Королев и М.К. Янгель). Создавать новые производственные технологии Б.Е. Патон поручил О.К. Назаренко, а оборудование — конструкторскому отделу А.И. Некрасова.

Реализация уникальных технологических возможностей ЭЛС зависела от «обеспечения» вакуумом (около 10–4 мм рт. ст.). Однако в начале 1960-х гг. в стране не было камер с объемом, достаточным для размещения крупногабаритных конструкций. В МЭИ, НИИ-48 и ряде других организаций занимались «созданием» вакуума в локальном объеме, разрабатывались соответствующие пушки. В ИЭС им. Е.О. Патона решение этих проблем форсировал Борис Евгеньевич, регулярно рассматривая их на совещаниях.

Устройства, обеспечивающие локальное и мощное вакуумирование, установки с автоматическим регулированием режима были сконструированы, был изучен механизм проплавления металла, гидродинамические и некоторые другие явления в сварочной ванне (Б.С. Касаткин, Г.П. Лесков, О.К. Назаренко, и др.). Но с разработкой технологии ЭЛС алюминиевых сплавов возникли особые проблемы. Сравнительно низкая температура испарения компонентов сплавов обуславливала быструю «порчу» вакуума, нарушение параметров режима и нестабильную работу энергетического комплекса. И чем толще были

свариваемые заготовки, тем выше была энергия луча и тем интенсивнее было испарение и значительнее перепады вакуума в зоне сварки. В США специалисты, столкнувшись с этой же проблемой, сомневались в возможности «обойти природу» и готовы были отказаться от внедрения ЭЛС в ракетостроение. Б.Е. Патон к изучению процессов парообразования подключил технологические отделы. К разработке технологии ЭЛС алюминиевых сплавов подключили А.А. Бондарева.

А.А. Бондарев исследовал процессы взаимодействия электронных лучей с металлом, измерил термические циклы на всех стадиях образования сварного соединения и давление потоков электронов на поверхность изделия, определил природу дефектов, обобщил в диссертациях — первых в СССР по данной проблеме. На основании этих и других исследований создавалось сварочное оборудование и разрабатывались технологические процессы, позволившие решить многие сложные задачи современной техники.

Способ ЭЛС с локальным вакуумированием был впервые реализован при изготовлении обечаек, в том числе вафельных, баков ракет большого диаметра с длинными стыковыми соединениями и крупногабаритных поковок из сплава 1201 на заводе «Прогресс» и других заводах отрасли, а также толстолистовых полотнищ заготовок алюминиевых цистерн взамен дуговой сварки. При ЭЛС степень разупрочнения основного металла и ширина ЗТВ значительно меньше, а прочность соединений на 10–15 % выше, чем при дуговых способах; структура металла шва и в зоне сплавления мелкокристаллическая. Технология обеспечивает минимальные сварочные деформации (не более 0,03 мм при диаметре до 100 мм), возможность сварки конструкций при отсутствии доступа к обратной стороне стыка и др. Незначительный (не выше 60°C) разогрев расположенных внутри оболочки монтажных элементов и микросхем допускает герметизацию микросхем высокоточных приборов с одновременным вакуумированием, расположение гермовводов на расстоянии до 2 мм от сварного шва. Несмотря на сложное оборудование, ЭЛС начала вытеснять дуговые технологии сварки ответственных и сложных конструкций: цилиндрических и конических оболочек от 300 до 8000 мм, топливных систем, криогенных емкостей и других элементов ракетно-космических аппаратов из алюминиевых и магниевых сплавов.

14–15 октября 1971 г. на конференции по ЭЛС в докладе «Современное состояние и задачи элект-

тронно-лучевой сварки» академик Б.Е. Патон отметил, что «состояние этого способа сварки в нашей стране характеризуется серьезными достижениями в изучении электронно-лучевого процесса и свойств соединений широкого круга материалов. Накоплен богатый опыт в разработке и совершенствовании технологии и оборудования...». В 1970-х годах было введено в эксплуатацию около 200 установок для ЭЛС ответственных изделий.

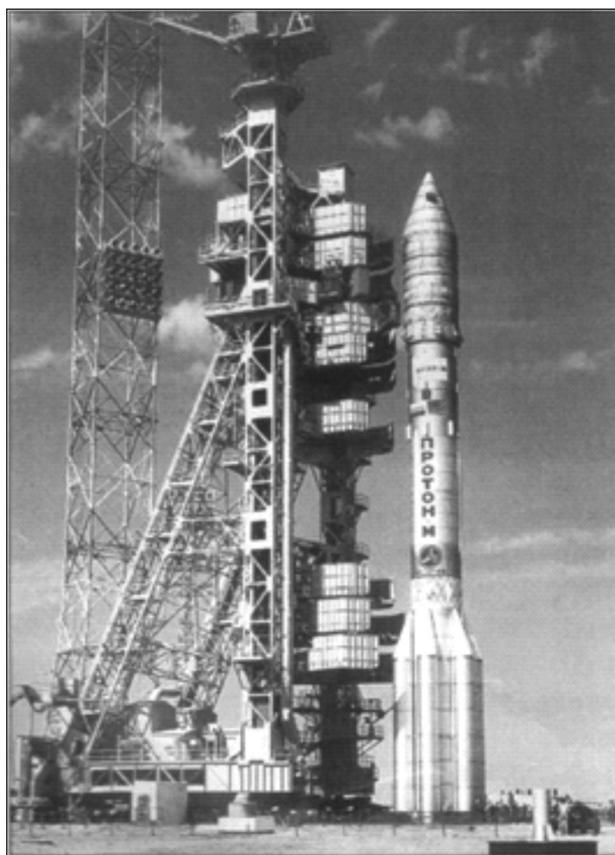
ЭЛС была применена и для не совсем обычного дела — для производства полуфабрикатов тонкостенных алюминиевых панелей с ребрами жесткости. Эти панели — стенки топливных баков обычно изготавливали горячим прессованием, но только из высокопластичных сплавов и при определенных соотношениях размеров листов и ребер. Но выпрессовывать полотнища с ребрами необходимых размеров из высокопрочных сплавов не удавалось, поэтому для уменьшения массы значительную часть металла фрезеровали или вытравливали из толстых листов, оставляя квадратные полости, и в результате панель выглядела как вафля. Б.Е. Патон не мог не вмешаться и предложил неординарное применение ЭЛС — ребра приваривать к сравнительно тонким листам, при этом для исключения деформаций конструкцию растягивать.

Были разработаны технологии приварки ребер одним, двумя угловыми швами, прорезным швом (Л.М. Лобанов, О.К. Назаренко, А.А. Бондарев). Применение оребренных панелей из новых алюминиевых сплавов и ЭЛС баков из них не только удешевило производство, но и позволило улучшить тактико-технические данные ракетных комплексов. Так, боевые возможности Р-36М2



*Б.Е. Патон знакомит М.С. Горбачева, В.В. Щербицкого и В.С. Шевченко с технологией изготовления ребренных панелей*

(«Воевода») с межконтинентальной баллистической ракетой 15А18М (РС-20В; SS-18) с 10 боеголовками (ведущий конструктор КБЮ С.И.Ус), каждая мощностью, эквивалентной полмегатонны, в 1989 г. значительно превосходили боевые качества ее первых образцов и до настоящего времени не превзойдены (см. № 12, 2011).



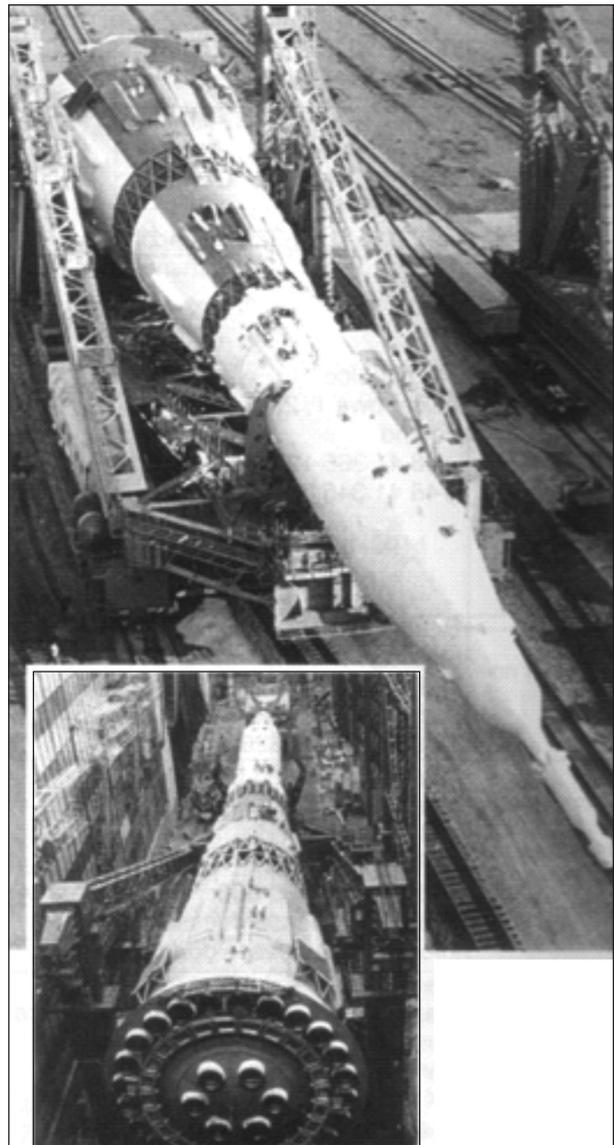
*Ракета-носитель «Протон»*

А.А. Бондаревым, Е.Г. Терновым и другими комплекс прогрессивных сварочных технологий был внедрен в производство тяжелой ракеты-носителя «Протон» В.Н. Челомея (завод им. М.В. Хруничева), ракет морского базирования на Красноярском машзаводе, крылатых ракет на заводе «Стрела» в Оренбурге, днепропетровских ракет «Космос», «Циклон», «Зенит», «Днепр» и других ракет, стоящих на боевом дежурстве или успешно используемых для запуска космических аппаратов в интересах науки, обороны или народного хозяйства. Кроме баков, сваривают корпуса электровакуумных приборов, гироскопов, а также толстостенных (40 мм) алюминиевых оболочек термоядерных бомб в НИИ-101 в Челябинске-70.

Иная судьба постигла ракетный космический комплекс 11А52 (Н1-ЛЗ, SL-15) для полета на

Луну. К созданию самого сложного комплекса С.П. Королев приступил в 1961 г. и выбрал неудачный проект. Одна из ошибок — это огромные нетранспортабельные блоки трехступенчатой ракеты-носителя Н-1 диаметром 9 м. Пришлось строить завод на космодроме (Байконур), однако контрольно-испытательные работы проводились только на стартовом оборудовании. Что касается баков, то они были из сплава АМгб, сваривались дуговыми способами (с участием бригады Б.А. Стебловского). В 1969 г. начались пробные запуски, все закончившиеся мощными взрывами. 24 ноября 1972 г. после четвертой аварии работы были прекращены. «Лунная гонка» завершилась поражением Советского Союза. Среди множества причин катастроф (от организационных до мистических) указывался и чрезмерный стартовый вес — 2820 т, значительно превышающий вес «Сатурна-5», который вывел американцев на Луну. Длина комплекса также была рекордной — 90 м. Впрочем, сварочные технологии здесь были ни при чем. Генеральный конструктор ракетно-космических комплексов НПО «Энергия» (бывшее КБ-1 С.П. Королева) Ю.П. Семенов пишет: «Борис Евгеньевич сделал большой вклад в создание ракеты Н-1 (для освоения Луны) по сварке огромных емкостей из алюминия. Очень много сделал и для кораблей «Союз» и «Прогресс». Наши личные творческие взаимоотношения, несмотря на распад СССР, продолжают. Готовятся новые поколения аппаратов, где реализуются ракетно-космические технологии».

В 1976 г. началась разработка космического комплекса «Энергия — Буран». Для изготовления конструкций орбитального корабля многоразового использования «Буран» из различных материалов, в том числе из различных алюминиевых сплавов (кабины из конических обечаек и днищ, силовые элементы из штамповок и поковок и др.) пригодились почти все способы сварки. Ракета-носитель «Энергия» состоит из 4 блоков первой ступени (диаметром 3,9 м и длиной 40 м каждый) и одного блока второй ступени диаметром 7,8 м и длиной около 60 м. Первая ступень разрабатывалась в КБЮ, вторая — в ОКБ-1 (В.П. Глушко), и, как отмечается в учебнике по технологии ракетостроения, «...наискладнішою задачею була розробка нової модифікації алюмінієвого сплаву, здатного витримувати колосальні навантаження, що виникають при польоті ракети, а також розробку паливних посудин небачених до цього габаритів». «Энергия» до сих пор является самым мощным в мире космическим транспортным



*Лунный ракетный комплекс Н1-Л3 на космодроме*

средством (стартовая масса 2400 т). Вспоминает главный конструктор комплекса Б.И. Губанов: «Утром 12 мая 1987 г. на стенд-старт «Энергии» приехал Михаил Горбачев. Выйдя из автобуса и поздоровавшись с встречавшими, он сказал, обращаясь ко мне: «Политбюро не позволит пуск этой ракеты». Тем не менее, успешный пуск, состоявшийся 15 мая, подтвердил высокую надежность комплекса. Эпопея «Энергии» — «Бурана» завершилась 15 ноября 1988 г. вторым стартом и триумфальной посадкой орбитального корабля в автоматическом режиме. (Впрочем, в США подсчитали, что челноки запускать невыгодно и оставшийся после катастроф комплект отправили в музей, а американские астронавты добираются на МКС на королёвских Р-7 — «Союз»).



*Иранская ракета Shihab-3 на основе P-17 Scud ОКБ-1*

С конца XX века основные усилия были направлены на освоение мощнейших (свыше 100 кВт) остросфокусированных пучков электронов, совершенствование технологии ЭЛС толстолистового материала из высокопрочных сплавов (Л.М.Лобанов, А.А.Бондарев, А.В.Лозовская, В.А.Пивторак и др.). Вершиной развития ЭЛС в ИЭС им. Е.О.Пато на (О.К.Назаренко и др.) можно считать универсальные установки типа КЛ-113 с контролем за процессом сварки и самодиагностикой, с огромными камерами, в которых размещаются узлы баков и другие крупные конструкции.

Следует отметить, что в разработке и освоении новых технологий совместно с ИЭС участвовали сварочные отделы и лаборатории многих КБ и ракетных предприятий, среди которых ведущие по-

зиции в отрасли занимали НПО «Энергия» с заводом «Прогресс» (В.А.Казаков, В.Н.Крюковский, Г.Л.Зубриенко, Ф.З.Тененбаум и др.) и Днепропетровский комплекс (М.А.Ахметшин, Н.Г.Воронов, О.С.Кузьменок, В.В.Бородин, Б.П.Ржанов и др.). Коллективные наработки — высокие технологии и современное оборудование — использованы в ракетостроении Китая, Северной Кореи, Ирана, Индии. Так, только ИЭС внедрил в Украине и за рубежом более 600 комплектов мощных электронно-лучевых установок, в том числе продал за рубеж 16 установок КЛ-113.

С 1960-х гг. БРК начинают использовать для научных целей, связи, телевидения, навигации, геологии, физических исследований и в других сферах деятельности. На базе 8К65 было изготовлено около тысячи РН серии «Космос». На основе 8К69 созданы двух- и трехступенчатые варианты РН «Циклон». Десятки МБР 15А18 (РС-20), которые по договору между Россией и США должны были быть уничтожены, успели переделать на предприятии «Дніпро». Следует подчеркнуть, что все эти РН признаны самыми надежными в мире.

*(Из журнала «Сварщик в Белоруссии»,  
№ 1(62) 2014)*