



СВАРОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Ч. 1. Анализ многофакторного потенциального риска

Академик **Б. Е. ПАТОН**, **А. Р. БУЛАЦЕВ**, **С. С. ГАВРИШ**, **А. А. ЗАГРЕБЕЛЬНЫЙ**, **С. В. ПАВЛОВА**,
В. Ф. ШУЛЫМ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы факторы, представляющие опасность при проведении технологических работ с помощью электронно-лучевого инструмента в условиях космоса.

Ключевые слова: ручной электронно-лучевой инструмент, скафандр, радиационное и световое излучения, высокое напряжение, коронный разряд, расплавленный металл, электромагнитные помехи, космический объект

Данная работа состоит из двух частей. В первой освещены проблемы, связанные с риском при выполнении ручных технологических процессов; во второй части рассмотрены возможности снижения степени риска.

Освоение космического пространства и практическая реализация многих проектов в области космонавтики вряд ли будут возможны без широкого применения сварки непосредственно в космосе. Сооружение орбитальных станций длительной эксплуатации связано с их ремонтом и восстановлением во время полета, при этом с увеличением их массы и габаритов возникает необходимость в разворачивании, сборке и монтаже конструкций в открытом космосе. В связи с этим решение проблем неразъемного соединения и резки металлов, а также нанесения тонкопленочных покрытий приобретает особую важность [1].

Из существующих в настоящее время способов на основании главных критериев оценки как самого сварочного процесса (универсальность, технологичность и простота), так и требований к космическому оборудованию (высокая надежность, безопасность, минимальные масса и объем, малая энергоемкость) электронно-лучевая сварка (ЭЛС) была выбрана как наиболее перспективная. Результаты многочисленных экспериментов, проведенных в наземных барокамерах, летающих лабораториях и непосредственно в космосе, подтвердили правильность выбора электронного луча в качестве источника нагрева, что, вероятно, не исключает применение и других традиционных сварочных технологий [2–7].

Первая электронно-лучевая сварочная установка была изготовлена в ИЭС им. Е. О. Патона в 1969 г. в составе аппаратуры «Вулкан» [8]. Из соображений улучшения техники безопасности и качества сварного шва работы на ней выполняли в автоматическом режиме, что не всегда целесообразно, например, для ремонтно-восстановительных работ. Дальнейшее усовершенствование и универсализация сварочного оборудования, направ-

ленные на преодоление не только технических, но и психологических трудностей, связанных с работами с расплавленным металлом, привели к созданию для космонавта ручного электронно-лучевого инструмента (РЭЛИ), позволяющего осуществлять различные технологические операции.

Электронно-лучевая технология является сравнительно молодой, применяемой как в наземном сварочном производстве, так и в экстремальных, в частности в космических, условиях. Она характеризуется следующими основными преимуществами:

- высокий КПД преобразования электрической энергии в тепловую;

- значительная концентрация энергии в поперечном сечении пучка электронов;

- отсутствие реактивных сил при работе с электронным пучком;

- небольшой объем ванны расплавленного металла и, следовательно, низкая чувствительность к невесомости;

- возможность использования различных технологических операций (сварка, пайка, резка, нанесение покрытий и т. д.).

Однако особенности космоса (вакуум, невесомость, большие перепады окружающих температур и световой обстановки и др.) как среды для выполнения технологических операций с нагретым и расплавленным металлом оказывают влияние на процессы, протекающие при сварке [9], на физико-химические свойства конструкционных материалов, что приводит к изменению их эксплуатационных характеристик [10], а также на человека-оператора во время работы.

«Горячая» ручная или механизированная сварка и в наземных условиях является профессионально-рискованным технологическим процессом, а при работе в экстремальных условиях, в частности в открытом космосе, к традиционным факторам риска добавляются еще и специфические:

- безопасность оператора;

- окружающее низкое давление;

- световое и тепловое излучения;

- ограниченная подвижность оператора в космическом защитном снаряжении.



Безопасность затрудняет действия и нарушает координацию движений оператора, что может повлечь за собой брак в работе, случайные включения рабочего инструмента, направление его непосредственно на оператора, космический объект, а также соприкосновения оператора с нагретыми зонами инструмента или обрабатываемого изделия.

Низкое давление окружающей среды опасно для оператора в случае механического повреждения его снаряжения и возможной разгерметизации скафандра.

Световое излучение Солнца ухудшает условия наблюдения за ходом технологического процесса, влияет на изменение температуры рабочего инструмента и обрабатываемого изделия, доводя его до уровня, опасного для снаряжения при случайном соприкосновении.

Ограниченная подвижность оператора из-за жесткости специального снаряжения приводит к быстрой утомляемости, резко сужает рабочую зону и зону обслуживания, скорость и координацию движений, что может стать причиной возникновения нештатных ситуаций.

Осуществление ЭЛС в условиях открытого космоса с помощью РЭЛИ требует детальной отработки технологий, а также конструирования технологической аппаратуры. Особо важное значение имеет обеспечение максимальной безопасности оператора-сварщика и работы оборудования при выполнении сварочных работ в космосе [11, 12].

Несмотря на то что при разработке сварочных космических технологий, проектировании специального оборудования и проведении экспериментальных работ безопасности уделялось особое внимание, в ранее опубликованных научных трудах эти проблемы отражены вскользь. В настоящей работе сделана попытка проанализировать имеющиеся знания, системно обобщить накопленный опыт и предложить способы снижения (исключения) риска при выполнении подобных сварочных операций. Особо следует подчеркнуть, что авторы настоящей статьи при ее подготовке использовали опыт, знания и профессионализм своих коллег — специалистов таких коллективов, как РКК «Энергия им. С. П. Королева», АООТ «Звезда», ЦПК им. Ю. А. Гагарина, ЦУП (Россия), Центра им. Дж. Маршалла НАСА (США), которые совместно с ИЭС им. Е. О. Патона выполнили огромный объем теоретических исследований, экспериментальных работ и уникальных испытаний в условиях непосредственно космических и имитирующих их, и выражают им свою благодарность.

Факторы риска. При работе с РЭЛИ могут иметь место факторы, представляющие потенциальную опасность для оператора и космического объекта:

термическое воздействие электронного пучка; рентгеновское и световое излучения, сопутствующие электронно-лучевым процессам;

высокое напряжение электрических цепей;

наличие расплавленного металла на обрабатываемых изделиях и в тигле;

наличие горячих зон на рабочем инструменте и на обрабатываемых изделиях;

брызги и загрязнение поверхности скафандра и элементов космического корабля продуктами, неизбежными при сварочных технологиях;

электромагнитные помехи, влияющие на служебные системы космического объекта;

токсичность материалов деталей технологического оборудования.

Термическое воздействие электронного пучка. Процесс ЭЛС основан на использовании тепла, выделяемого при торможении сфокусированного потока электронов, ускоренных до высоких энергий [13]. Катод сварочной пушки эмитирует пучок электронов, который ускоряется вследствие разности потенциалов между катодом и анодом. Электроны, сталкиваясь с изделием, тормозятся, их кинетическая энергия передается атомам вещества, происходит разогрев и плавление материала. Такое воздействие электронных пучков на вещества способствует их широкому и многоцелевому использованию для термической обработки (сварки, резки, пайки и т. п.) различных материалов.

Термическое воздействие электронного луча зависит от плотности энергии, управляемой системой фокусировки, в зоне сварки и, следовательно, определяется фокусировкой и мощностью луча.

Термические операции с РЭЛИ в условиях космического пространства могут стать причиной возникновения различных небезопасных ситуаций. Так, в случае выхода из-под контроля технологического процесса вследствие сбоя в работе оборудования или рабочего инструмента, физической усталости оператора и различных внешних воздействий на него не исключается возможность попадания пучка электронов РЭЛИ на детали космического объекта или снаряжение оператора. Попадание луча на мягкие части скафандра приводит к его разгерметизации, а на детали объекта — к их частичной или даже полной непригодности.

Жесткость скафандра, имеющего избыточное давление, затрудняет подвижность, равномерность перемещения оператора и повышает утомляемость его руки. Все это может приводить к нарушению процесса сварки и браку в работе.

Рентгеновское и световое излучения. При столкновении потока электронов с препятствием (материалом) часть их энергии превращается в рентгеновское излучение, поэтому каждая электронно-лучевая установка фактически представляет собой рентгеновскую трубку.

Рентгеновское излучение состоит из характеристического и тормозного спектров со значительным количественным преобладанием последнего. Тормозное излучение характеризуется минимальной длиной волны λ_{\min} [14]:

$$\lambda_{\min} = \frac{12,4}{U} \text{ (нм)}, \quad (1)$$

где U — ускоряющее напряжение, кВ.

Как следует из формулы (1), с увеличением ускоряющего напряжения длина волны излучения уменьшается (излучение становится более жестким), а его интенсивность i возрастает пропорционально квадрату ускоряющего напряжения, т. е.

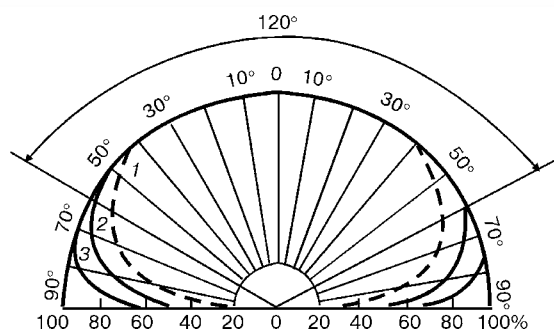


Рис. 1. Пространственное распределение интенсивности тормозного излучения i_x/i_0 при разном напряжении: 1 — 10; 2, 3 — 70 кВ соответственно без и с алюминиевым фильтром толщиной 10 мм

$$i = kU^2,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Зависимость интенсивности излучения от атомного номера Z материала изделия (анода) близка квадратичной для малых значений ускоряющего напряжения, а для электронных пучков высоких энергий интенсивность излучения пропорциональна Z .

Рентгеновское излучение со значениями энергии до 70 кВ распространяется из сварочной ванны навстречу электронному пучку почти равномерно в пределах пространственного конуса с углом около 120° в вершине (рис. 1). Интенсивность излучения падает пропорционально квадрату расстояния от источника излучения до облучаемого объекта.

Приведенная диаграмма распределения интенсивности характерна для точечного источника излучения и плоских поверхностей. В случае проведения работ с РЭЛИ эта диаграмма будет иметь более узкий и вытянутый вид.

Проникающая способность рентгеновского излучения зависит от длины его волны λ и материала защитного слоя. Коэффициент ослабления излучения следующий:

$$\mu = k\lambda^3 Z^4, \quad (2)$$

где Z — атомный номер материала экрана.

После прохождения слоя вещества толщиной x интенсивность пучка рентгеновских лучей i_x с начальной интенсивностью i_0 равна

$$i_x = i_0 e^{-\mu x}.$$

В таблице приведены данные об ослаблении мягкого рентгеновского излучения с длиной волны $\lambda = 0,071$ нм при использовании алюминиевого экрана при ускоряющем напряжении 17,5 кВ.

Оценку необходимой толщины x защитных экранов из стали и свинца можно сделать, используя данные рис. 2 [15].

Что касается светового излучения как одного из физических явлений, сопровождающих ЭЛС, то его понимание является одной из важнейших задач при визуальном контроле сварочного процесса, выполняемого РЭЛИ. Излучение светового диапазона — это тепловое излучение поверхности жидкой ванны с плотностью мощности $\sigma_T T_{кр}^4$ (σ_T — постоянная Стефана —

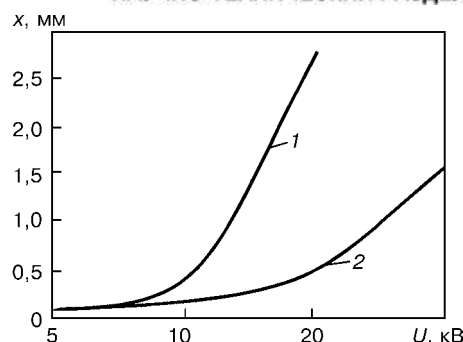


Рис. 2. Минимально необходимая толщина стального (1) и свинцового (2) защитных экранов в зависимости от уровня ускоряющего напряжения

Больцмана; $T_{кр}$ — температура кратера сварочной ванны) [13].

Размеры зоны сварки при ЭЛС небольшие, но ее яркость, особенно при сварке тугоплавких материалов, например титана с точкой плавления более 1700°C , достигает болевой границы зрения. Углубленное расположение источника света (кратера) при этом повышает контрастность изображения зоны сварки и примыкающих к ней участков, что вызывает болевые ощущения и быстрое ухудшение зрения. В этом случае снижается возможность различения степени яркости и происходит потеря информации, необходимой оператору-сварщику при прямом визуальном контроле процесса.

Высокое напряжение. Электронно-лучевая сварочная аппаратура, используемая в космосе, должна быть максимально безопасной для оператора-сварщика и отличаться минимальными массой, объемом и энергопотреблением. Совокупность электрических устройств, обеспечивающих процесс ЭЛС, можно разделить на такие группы:

- цепи высоковольтного источника питания пушки;
- цепи накала электронной пушки;
- цепи управления электронным пучком.

Некоторые из этих цепей находятся под высоким напряжением, равным или близким напряжению ускорения [16].

Исполнительным инструментом при ЭЛС является электронно-лучевая пушка с высоким по отношению к аноду ускоряющим электрическим потенциалом катодных цепей (в ручном варианте 5... 10 кВ), что представляет собой потенциальную опасность поражения оператора электрическим током.

Немаловажной проблемой безопасности работы как оператора, так и технологического оборудования является предотвращение появления разрушающего или повреждающего коронного разряда

Коэффициент ослабления i_x/i_0 рентгеновского излучения алюминиевым экраном в зависимости от его толщины

Параметры излучения	Толщина алюминиевого экрана, мм					
	0,1	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
$\lambda = 0,071$ нм* $U = 17,5$ кВ	0,87	0,5	0,25	0,06	0,015	0,004
$\lambda = 0,245$ нм** $U = 5$ кВ	$22 \cdot 10^{-3}$	$125 \cdot 10^{-3}$	$65 \cdot 10^{-3}$	$1,575 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$

* Данные работы [14].

** В пересчете на напряжение 5 кВ по формулам (1) и (2).



в любой окружающей среде космического объекта, а также электростатического заряда на элементах конструкции оборудования.

Расплавленный металл. Процесс ЭЛС сопровождается совокупностью сложных тепловых и динамических явлений, происходящих при плавлении и кристаллизации вещества в локальной зоне, нагреваемой электронным лучом с высокой плотностью энергии. При этом вещество достигает температуры плавления и часть его переходит из твердого состояния в жидкое. Дальнейший нагрев повышает температуру вещества до точки кипения, при которой происходит его частичный переход из жидкого состояния в парообразное [13].

В условиях микрогравитации поведение жидкого вещества сварочной ванны определяется межмолекулярным взаимодействием сил поверхностного натяжения. Необходимо отметить, что лучевые процессы являются спокойными. Расплавленный металл сварочной ванны ввиду малого объема расплава (до 100 мм³), характерного для ЭЛС тонкого металла, и быстрой кристаллизации (1... 3 с) реальной опасности для оператора не представляет.

Для предотвращения попадания паров расплавленного вещества в зону катодного узла при нанесении покрытий способом испарения днище тигля во избежание прожога нагревают расфокусированным потоком электронов, что позволяет обеспечить более равномерный нагрев и существенно увеличить количество расплавленного металла в тигле (до 1000 мм³). В этом случае необходимо учитывать воздействие инерционных сил при манипуляциях оператора с инструментом на расплав, так как не исключается возможность «выплывания» расплавленного металла из тигля.

Горячие изделия. Под тепловыми процессами при сварке понимают изменение температуры свариваемых деталей за счет тепла, подводимого от источника нагрева, распространение тепла по изделию и отвод его в окружающую среду [17].

Горячие зоны (свыше 150 °С) на деталях возникают вокруг сварного шва. Их температура постепенно понижается за счет излучения и теплопроводности материалов изделий и элементов их закрепления.

Для обеспечения безопасности оператора, работающего в скафандре, существуют определенные температурные ограничения. Так, согласно требованиям американского стандарта NASA-STD-300/vol.1/rev, во время внекорабельной деятельности оператора температура поверхности, к которой может прикоснуться перчатка скафандра, ограничивается диапазоном значений температур 113... 120 °С и временем соприкосновения 0,5 мин.

Горячий инструмент. При выполнении различных технологических процессов РЭЛИ нагревается в результате излучения катодного узла и сварочной ванны, а также «оседания» периферийных электронов на аноде пушки или вследствие теплоотдачи тигля с расплавленным металлом при нанесении покрытий.

Например, при проведении исследований на борту космической станции «Салют-6» не были приняты специальные меры, предотвращающие

нагрев рабочего инструмента электронно-лучевой установки «Испаритель-М», поэтому температура наружных частей испарительного блока достигала 300... 350 °С, а температура остальных деталей не превышала 70 °С [18].

Брызги и загрязнение поверхности скафандра оператора. Для сварочных операций и особенно процесса нанесения покрытий способом электронно-лучевого испарения характерно значительное парообразование расплавленного вещества в рабочую зону, что приводит к загрязнению снаряжения оператора, рабочего инструмента и объектов космического аппарата и является одним из потенциально опасных факторов для оператора. Кроме того, нельзя не упомянуть и о возможном попадании брызг расплавленного металла на снаряжение, инструмент или элементы интерьера космического корабля при нарушении технологического процесса.

Электромагнитные помехи. Высокая степень сложности технологических экспериментов, проводимых в экстремальных космических условиях, и современный уровень развития элементной электронной базы космической аппаратуры предъявляют жесткие требования к электромагнитной совместимости технологического и бортового оборудования, что означает полное исключение влияния одних технических средств на другие. На параметры качества электромагнитной энергии воздействуют любые отклонения параметров напряжения, тока или частоты от номинальных значений, что приводит к нарушению функционирования оборудования.

Электромагнитная несовместимость технических средств оказывает влияние на безопасность их работы. Может произойти отказ систем, обеспечивающих безопасность работ (исполнительных механизмов станции, самозапуск двигателей, самопроизвольный подрыв пиротехнических средств, наводка антенных устройств и т. п.), или сбой научной и служебной аппаратуры из-за недостаточной помехозащищенности, или потеря информации систем связи.

Токсичность и воспламеняемость материалов технологического оборудования. При рассмотрении фактора токсичности особое внимание следует уделять выбору материала деталей технологического оборудования, особенно той части, которая размещена в отсеках космического корабля (кабельные сети, тест-системы и т. п.), поскольку в противном случае во время работы оператора не исключается возможность их воспламенения или попадания в окружающую среду токсичных веществ.

Все рассмотренные факторы риска относятся глубоко к конкретной, т. е. к ручной электронно-лучевой технологии. Их негативное влияние, а также проблема снижения отрицательных последствий для деятельности оператора и технологических процессов была всесторонне изучена в рамках различных целевых программ и испытаний с использованием специальных комплексных стендов учеными и специалистами Украины, России и США при подготовке к выполнению космических проектов «УРИ» (универсальный рабочий инстру-



мент, первая модификация РЭЛИ), МЭСК (международный эксперимент по сварке в космосе) и «Флагман» (новая модификация РЭЛИ, аппаратура «Универсал»). Результаты этих исследований представлены во второй части данной работы.

1. Патон Б. Е. Сварка в космосе // Космос: технологии, материаловедение, конструкции / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — С. 17–18.
2. Применение сварки для ремонта космических объектов / Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, В. Н. Бернадский и др. // Косм. исслед. на Украине. — 1976. — № 9. — С. 3–5.
3. Сварочные процессы в космосе / Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, В. Ф. Лапчинский и др. // Сварка и спецметаллургия. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 121–129.
4. Рассел К. К., Андерсон Р. Г. Технологические испытания инструментов для обработки материалов в космосе // Автомат. сварка. — 1999. — № 10. — С. 23–30.
5. Ноги К., Аоки Я., Фудзи Х. Особенности ЭЛС и дуговой сварки неплавящимся электродом в условиях микрогравитации // Там же. — 1999. — № 10. — С. 39–43.
6. Шульм В. Ф., Сорокин И. В. Космическая технология в Японии // Там же. — 1999. — № 10. — С. 117–119.
7. Fuji H., Aoki Y., Nogi K. Electron beam and has tungsten arc welding under micrograviti // Trans. JWRI. — 2001. — 30, № 1. — P. 105–109.
8. Патон Б. Е., Кубасов В. Н. Эксперимент по сварке металлов в космосе // Автомат. сварка. — 1970. — № 5. — С. 7–12.
9. Пацкевич И. Р., Рябов В. Р., Деев Г. Ф. Поверхностные явления при сварке металлов. — Киев: Наук. думка, 1991. — С. 113–118.
10. Prediction of structural materials performance at long-term servise in space conditions / S. V. Bakushin, D. L. Demidov, Yu. D. Morozov et al. // Proc. from the conf. «Welding in space and the construction of space vehicles by welding» (Sept. 24–26, 1991, Miami). — Miami, 1991. — P. 299–306.
11. Особенности оборудования для технологических работ в космосе / Д. А. Дудко, А. А. Загребельный, В. Е. Патон и др. // Космос: технологии, материаловедение, конструкции / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — С. 95–99.
12. Патон Б. Е., Стесин В. В., Загребельный А. А. Опыт конструирования технологического оборудования для работ на космических объектах // Автомат. сварка. — 1999. — № 10. — С. 59–66.
13. Назаренко О. К., Кайдалов А. А., Ковбасенко С. Н. Электронно-лучевая сварка / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1987. — С. 255.
14. Хароджа Ф. Н. Обиций курс рентгенотехники. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. — С. 562.
15. ОСП-72/80. Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 57 с.
16. Коваль А. Б., Оболонский А. П., Салап В. И. Автоматическое регулирование электронно-лучевой сварки. — Киев: Техніка, 1971. — 116 с.
17. Сварка в СССР. В 2 т. Т. 2. Теоретические основы сварки, прочности и проектирования. Сварочное производство. — М.: Наука, 1981. — 493 с.
18. Развитие техники нанесения тонкопленочных покрытий в натуральных условиях / А. А. Загребельный, Е. С. Лукаш, В. П. Никитский и др. // Труды XXII чтений, посвящ. разраб. науч. наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. — М.: ИМЕТ АН СССР, 1988. — С. 134–138.

Factors presenting a potential hazard in conductance of works under extreme conditions using electron-beam tool are analyzed including: X-ray and light radiation, high voltage, molten metal, hot workpiece and tool, spatters, electromagnetic interferences, toxicity of materials.

Поступила в редакцию 11.07.2002

К сведению читателей!

Ж. Дюбрессон. Виды неразрушающего контроля и качества сварки. — Париж: Публикации по сварке и ее применениям, 2002 г. — 496 с.
Формат 21×29,7 см, в твердом переплете. Цена 150 евро.

По вопросам приобретения обращаться в издательство:
PUBLICATIONS du SOUDAGE et de ses APPLICATIONS
90, rue des Vanesses — Z. I. PARIS NORD II
BP 50362-93420 VILLEPINTE
Tel.: 01 49 90 36 00 — Telecopie: 01 49 90 36 50
E-mail:psa3@wanadoo.fr

