



## СВАРОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ Ч. 2. СТЕПЕНЬ РИСКА И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО СНИЖЕНИЯ

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)

Рассмотрены результаты основных испытаний по проверке и установлению безопасности аппаратуры «Универсал» при выполнении сварочных операций в условиях открытого космоса и возможности снижения степени риска.

*Ключевые слова:* электронный луч, радиационное излучение, световое и инфракрасное излучение, высокое напряжение, электростатический разряд, брызги металла, испытания, снижение риска

Первые экспериментальные работы с ручным электронно-лучевым инструментом были осуществлены более 25 лет назад [1, 2]. Поскольку при проведении экспериментов предусматривалось непосредственное участие оператора, их программа включала анализ факторов потенциальной опасности, а также человеческих возможностей при выполнении сварки. На базе натуральных сварочных экспериментов на установке УРИ (1984, 1986 гг.) и наземных испытаний аппаратуры «Универсал» в рамках программ «Международный эксперимент по сварке в космосе» (МЭСК) и «Флагман», выполненных в конце 1990-х годов с использованием более совершенной испытательной и тренажерной базы, были проведены комплексные исследования безопасности ручных электронно-лучевых технологий и намечены дальнейшие пути их совершенствования.

В настоящее время продолжается строительство международной космической станции (МКС), плановая научная эксплуатация которой должна быть начата в середине текущего десятилетия. Создание МКС заставило участников этого уникального проекта стандартизировать практически все вопросы ее строительства и эксплуатации. Проведение МЭСК предшествовало программе «Флагман», поэтому все наиболее актуальные проектные и исследовательские проблемы по подготовке космического сварочного эксперимента с использованием электронно-лучевого инструмента нового поколения «Универсал» были отработаны в рамках этой программы специалистами ИЭС им. Е. О. Патона и NASA им. Д. Маршалла (MSFC). При подготовке эксперимента «Флагман» совместно со специалистами Российской космической корпорации (РКК) «Энергия» им. С. П. Королева, АООТ «Звезда» и ЦПК им. Ю. А. Гагарина были дополнены проведены контрольные исследования наиболее «узких», с точки зрения безопасности эксперимента, аспектов и отработан необходимый

цикл тренировок операторов в условиях, имитирующих космические.

Это вступление сделано нами с целью объяснить, почему большая часть представленных материалов получена при проведении исследований в одном из лучших американских космических центров MSFC.

### **Возможность поражения электронным лучом.**

При выполнении технологических работ электронным лучом в космосе одним из основных источников опасности является его поражающее действие. В рабочем инструменте используется короткофокусная электронная пушка, удельная мощность пучка в которой уменьшается в квадратичной зависимости при увеличении расстояния до объекта воздействия. Кроме того, случайное включение электронного луча практически невозможно, так как для этого необходимо осознанно выполнить несколько последовательных операций направленным в рабочую зону инструментом. Это повышает безопасность использования ручного электронно-лучевого инструмента, хотя определенная доля риска все же остается. Исходя из изложенного главным предметом исследования было воздействие электронного луча на материалы скафандра и защитного снаряжения космонавта-сварщика.

В ИЭС им. Е. О. Патона неоднократно проводились подобные исследования, которые подтвердили поражающую способность электронного луча. Однако при подготовке МЭСК американские специалисты повторили эти исследования. Они решили проверить предположение о том, что при попадании электронного луча на изолированный фрагмент материала снаряжения астронавтов произойдет накопление заряда и, как следствие, запирающее электронно-лучевой пушки (ЭЛП).

При проведении экспериментов (рис. 1) электронный луч направлялся с расстояния 25 мм на фрагмент скафандра, представляющий собой многослойный пакет материалов, который закреплен в металлической рамке, изолированной от вакуумной камеры и соединенной с измерительными устройствами. При этом появление луча не наблюдалось, хотя вся аппаратура и накал катода

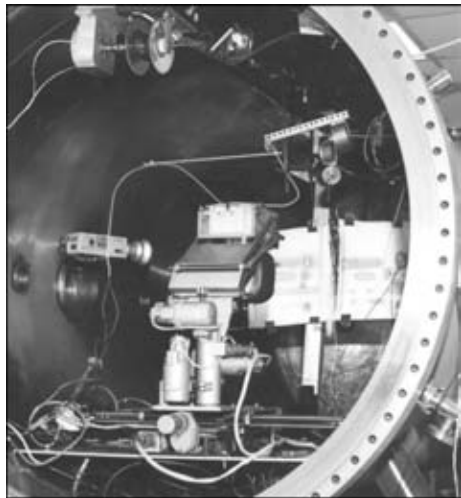


Рис. 1. Размещение оборудования при проведении экспериментов по воздействию электронного луча на материалы скафандра

были включены, а наличие заряда на образце материала скафандра зафиксировано не было. При переходе инструмента на металлическую рамку луч появлялся, а при переходе обратно на материал скафандра — мгновенно исчезал. И хотя заряд образца материала зафиксирован не был, при осмотре обнаружили подплавление материала в углу рамки. Аналогичная картина наблюдалась и на новом образце материала после его более надежного изолирования. При увеличении расстояния между инструментом и образцом до 100 мм и воздействии на него работающей пушки имело место подплавление верхнего слоя материала, после чего луч исчезал. Очередное появление луча сопровождалось прожогом следующего слоя и выключением луча, т. е. разрушение материала происходило циклически: электронный луч появлялся с интервалом 3...4 с примерно на 1 с. Однако накопление заряда и в этом случае зафиксировано не было. Подобная картина наблюдалась также при увеличении расстояния между инструментом и образцом до 175 мм.

Происходящие процессы можно объяснить следующим образом. При малом расстоянии от ЭЛП до образца происходит накопление заряда на его поверхности (хотя и не зафиксированное), что приводит к запиранию ЭЛП. В то же время наблюдается разогрев образца материала от накаливаемого катода, достаточный для выделения из него легколетучих компонентов. Последние, попадая в зону пушки, вызывают пробой, и срабатывает защита (электронный луч не появляется). При расстоянии до образца 100 мм и больше имеет место импульсное включение луча вследствие того, что из-за большого расстояния до образца накопленный на нем заряд успевает стечь, а легколетучие вещества из зоны пушки удаляются средствами откачки. При этом однозначно то, что электронный луч разрушает снаряжение оператора. Это подтвердили последующие эксперименты, выполненные с различными материалами защитного снаряжения оператора и элементов интерьера грузового отсека (тефлон, нектсел, кевлар, бетаклос) с расстояния 100 мм, включая фрагмент перчатки скафандра — с расстояния 500 мм. Во всех случаях

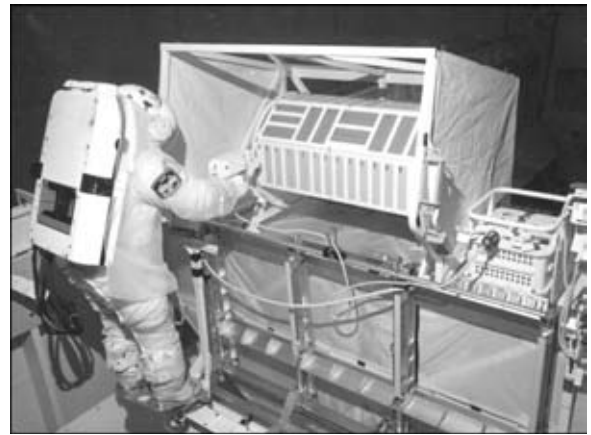


Рис. 2. Рабочее место космонавта-сварщика (поверх скафандра надета специальная защитная одежда)

при включении пушки наблюдалось ухудшение вакуума в камере от  $1 \cdot 10^{-2}$  до  $6 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1}$  Па в зависимости от материала образца.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов подтвердили, что защита от возможного случайного поражения снаряжения оператора при работе с ручным электронно-лучевым инструментом является самым важным фактором его безопасности. Для проведения эксперимента по сварке в космосе также необходима тщательная организация рабочего места оператора. При подготовке МЭСК этому уделялось особое внимание (рис. 2).

Наряду с подвижным рабочим местом оператора, размещением образцов на поворотном барабане, рабочих электронно-лучевых инструментов в специальных гнездах использовалось также механическое устройство. Оно было разработано и изготовлено на базе рабочей платформы орбитального аппарата «шаттл» и ограничивало возможный выход руки оператора с рабочим инструментом из зоны выполнения сварочных операций (рис. 3).

Специалисты ИЭС им. Е. О. Патона продолжают разработку устройств для повышения безопасности использования ручных электронно-лучевых инструментов [3–5]. Прошел испытания метод контроля пространственного положения инструмента с помощью бесконтактных датчиков ориентации, используемых в компьютерных системах. Благодаря этому методу можно задавать любую прямоугольную область в пределах  $50 \times 50$  см и



Рис. 3. Устройство, ограничивающее возможный выход руки оператора с инструментом из рабочей зоны



отслеживать положение инструмента. При выходе из этой зоны его функционирование автоматически прекращалось. Компьютер со специальным программным обеспечением составляет основу системы, с его помощью текущее положение инструмента «связывается» с заданной конфигурацией рабочей области, а также определяется наличие ситуации «выход из рабочей области». Описанный макет системы испытывали в вакуумной камере в составе установки «Универсал». При этом были получены положительные результаты. Достоинствами указанной системы является быстрота срабатывания, надежность, доступность обучения оператора приемам задания рабочей зоны и контроля за исполнением основного требования — отключением инструмента при выходе из рабочей зоны.

Следует отметить, что, помимо общих направлений снижения риска, при использовании ручного электронно-лучевого инструмента задача повышения уровня безопасности должна решаться применительно к конкретным условиям проведения работ.

Теоретически можно создать устройства, которые полностью исключают возможность случайного поражения оператора и окружающих предметов электронным лучом. Но, как отмечалось выше, работа с ручным инструментом в условиях открытого космоса требует от оператора определенных навыков. Поэтому создание систем безопасности не является самоцелью. Оно должно быть органической составляющей комплекса структурных и организационных мероприятий, облегчающих выполнение оператором сложных технологических операций.

**Измерение радиационного излучения при работе аппаратуры «Универсал».** В процессе создания и испытаний аппаратуры «Универсал» в связи с более высоким (до  $U = 8$  кВ;  $U_{x.x} = 10$  кВ) по сравнению с УРИ ускоряющим напряжением было определено поле рентгеновского излучения и дозовая нагрузка при ее работе. Эти испытания выполнены в 1989 г. совместно с представителями Института ядерной физики НАН Украины с использованием спектрометра рентгеновского излучения на основе датчика SLP-04160, расположенного в вакуумной камере, и анализатора типа 5604 «Ortec». Давление в вакуумной камере поддерживали на уровне  $5 \cdot 10^{-2}$  Па, а в качестве мишени использовали пластину из нержавеющей стали толщиной 20 мм (рис. 4).

Электронно-лучевая пушка ручного инструмента аппаратуры «Универсал» включалась повторно-кратковременно (3 мин работы, 3 мин перерыва). Электронный пучок имел следующие параметры:  $U = 8$  кВ и  $I = 52$  мА. Для того чтобы зарегистрировать 200 импульсов (по условиям методики измерения на данной аппаратуре), потребовалось функционирование ЭЛП в течение 18708 с. В результате обработки полученных данных общее поле излучения составило  $7 \cdot 10^{-5}$  Гр/ч.

Согласно данным работы [6], для гамма- и рентгеновского излучения при коэффициенте качества, равном единице, дозовая нагрузка не должна превышать  $1 \cdot 10^{-4}$  Дж/(кг·ч) для данной схемы и

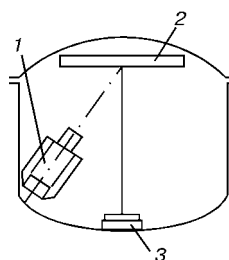


Рис. 4. Схема измерения радиационного излучения при работе аппаратуры «Универсал» с помощью датчика SLP-04160: 1 — ручной инструмент «Универсал»; 2 — мишень; 3 — датчик SLP-04160

рабочих материалов. На основании проведенных измерений был сделан вывод, что при выполнении технологических операций с использованием аппаратуры «Универсал» оператор может работать в течение 5...10 ч без специальных защитных средств.

В рамках МЭСК американские специалисты также провели измерения поля излучения сварочной ванны внутри и снаружи вакуумной камеры при выполнении сварочных операций с помощью аппаратуры «Универсал». Это было сделано, во-первых, для проверки степени защиты обслуживающего наземного персонала стенками вакуумной камеры и материалом ее иллюминаторов, во-вторых, для определения дозы облучения, которую может получить оператор в скафандре при выполнении сварочных операций в космосе. Измерение излучения сварочной ванны выполняли с помощью термолюминисцентных датчиков (ТЛД), используемых для проведения персонального мониторинга специалистов, которые подвергаются воздействию ионизирующей радиации. Расположение датчиков на наружной поверхности вакуумной камеры при проведении одного из радиационных тестов показано на рис. 5, а. Внутри камеры датчики (рис. 5, б) устанавливали на одинаковом расстоянии от сварочной ван-

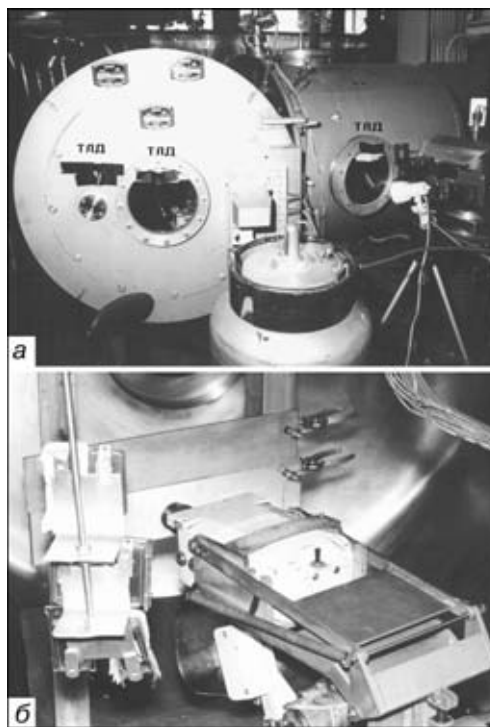


Рис. 5. Размещение термолюминисцентных датчиков на наружной поверхности (а) и внутри (б) вакуумной камеры при проведении радиационных тестов в MSFC



Таблица 1. Показания ТЛД, установленных внутри вакуумной камеры

Защитные средства (материал)	Доза облучения $\times 10^{-2}$ , Гр
Защитный экран на рукоятке инструмента (нержавеющая сталь толщиной 0,127 см)	0,158
Скафандр с защитным сварочным снаряжением (один слой тефлона)	4,900
Скафандр без защитного сварочного снаряжения	8,200
Остекленный гермошлем, защитный и сварочный щиток (лексан толщиной 0,5 см)	2,750

ны (450 мм), для обеспечения неподвижности сварочной ванны перемещали не инструмент, а обрабатываемый образец.

Часть датчиков была прикрыта образцами материалов скафандра, остеклением гермошлема и защитного сварочного снаряжения, что позволило оценить реальное воздействие излучения сварочной ванны на оператора в скафандре, а один датчик установлен под защитным экраном на рукоятке инструмента. При выполнении сварочных операций ток в пучке изменялся в пределах 55...76 мА.

Всего было обработано 22 образца из нержавеющей стали 304SS, алюминиевого сплава 2219 и титанового сплава Ti-6Al-4V. Общее время работы инструмента составляло 63 мин 10 с. При выполнении второго радиационного теста это время было сокращено до 30 мин, поскольку такое время было определено, как продолжительность выполнения сварочных операций по последнему сценарию проведения эксперимента в космосе. В этом случае мишенью служил алюминиевый сплав 2219, а датчики были прикрыты только образцами материала скафандра.

Анализ показаний датчиков после испытаний осуществлялся в Центре дозиметрии ионизирующей радиации Армии США с привлечением специалистов Американского национального института стандартов и технологий (НИСТ). Низкоэнергетическое рентгеновское излучение, создаваемое аппаратурой «Универсал», не попадало в рамки существующего алгоритма преобразования эквивалента дозы радиации. Поэтому возникла необходимость в дополнительной информации, касающейся работы ТЛД в области энергии фотонов. Благодаря данным, полученным в НИСТ, стало возможным максимально точно определить накопленные датчиками дозы.

Датчики, установленные на наружной поверхности вакуумной камеры и ее иллюминаторах, остались «чистыми», а установленные внутри камеры и ничем не защищенные — «зашкаливали», поскольку дозы облучения были настолько высоки, что анализирующие системы не могли их определить. Информация, полученная с помощью датчиков с различной степенью защиты (все данные приведены к 30-минутной продолжительности выполнения сварочных операций), представлена в табл. 1. Как видно из таблицы, применение защитного сварочного снаряжения (легкосъемного тефлонового костюма) уменьшает уровень облу-

чения оператора в 1,7 раза. Таким образом, увеличение количества слоев материала костюма обеспечивает требуемую степень защиты оператора. Однако в отчете [7], представленном американскими специалистами, не приводятся допустимые по американским нормам дозы облучения. Не содержится в нем также информация о результатах измерений, свидетельствовавших бы об их превышении. Комиссия по безопасности, работавшая во время подготовки МЭСК и рассмотревшая все аспекты безопасности, ни разу не поднимала вопрос о радиационной защите оператора. Авторы ограничились только констатацией полученных результатов и предоставляют право специалистам в этой области сделать самостоятельные выводы. При этом следует отметить, что измерение интенсивности радиационного излучения низкоэнергетических источников является непростой задачей как в нашей стране, так и в США, о чем свидетельствуют результаты проведенных испытаний. Поэтому при подготовке сварочного эксперимента на борту ОК «Мир» по программе «Флагман» авторы руководствовались нормами, приведенными в работе [6].

**Измерение интенсивности светового и инфракрасного излучений сварочной ванны.** Эти испытания проведены в сентябре 1996 г. в MSFC. Их целью было получить ответ на вопрос комиссии по безопасности о вредном воздействии на зрение оператора видимого и инфракрасного излучений ванны расплавленного металла при проведении сварочных операций в космосе. В ходе испытаний были поставлены следующие цели: измерение интенсивности излучения сварочной ванны в процессе сварки всех предполагаемых материалов с использованием аппаратуры «Универсал» в диапазоне волн длиной  $\lambda = 300...1100$  нм с последующей экстраполяцией полученных результатов до  $\lambda = 3000$  нм (использував теорию излучения черного тела); определение достаточности защитного светофильтра гермошлема астронавта-сварщика как надежной защиты глаз; выявление, для каких из свариваемых материалов необходима защита глаз.

Измерения проводили во время проплавления с помощью ручного электронно-лучевого инструмента аппаратуры «Универсал» алюминиевых сплавов 2219 толщиной 6 мм, 5456 толщиной 6 мм, нержавеющей стали 304SS толщиной 2,5 мм титанового сплава Ti-6Al-4V толщиной 1,5 мм.

Был использован спектральный радиометр «Optronics 740A», измеряющий интенсивность излучения как функцию длины волны и свариваемого материала. Температуру сварочной ванны определяли с помощью пирометра с лазерным прицелом. Измерения проводили через иллюминаторы вакуумной камеры, а для учета погрешностей, вносимых их стеклами, светопередачу иллюминаторов определяли до и после сварки каждого материала. Расстояние от объектива радиометра до сварочной ванны составляло 63,5 см.

Предельно допустимые значения дозы светового излучения для предотвращения поражения глаз в результате чрезмерного воздействия оптического



Таблица 2. Дозы излучения и максимальное время воздействия на глаза

Последствие вредного воздействия	$\lambda$ , нм	Предельно допустимые дозы излучения, мВт/см <sup>2</sup>	С защитой		Без защиты	
			Рассчитанные дозы излучения, мВт/см <sup>2</sup>	Максимально допустимое время воздействия, ч	Рассчитанные дозы излучения, мВт/см <sup>2</sup>	Максимально допустимое время воздействия, ч
Фотокератит	180...400	3	$1,3 \cdot 10^{-9}$	> 8	$1,3 \cdot 10^{-9}$	> 8
Развитие катаракты в результате термического воздействия ультрафиолетового излучения	320...400	1	$2,0 \cdot 10^{-8}$	> 8	$2,6 \cdot 10^{-5}$	> 8
Фоторетинит, вызванный «голубым светом»	400...700	10	$3,6 \cdot 10^{-4}$	7,8	$2,2 \cdot 10^{-3}$	1,25
Термическое поражение сетчатой оболочки	400...1400	5	$1,6 \cdot 10^{-3}$	> 8	$13,7 \cdot 10^{-3}$	> 8
Термическое поражение роговой оболочки с возможным развитием катаракты	770...3000	10	0,27	> 8	4,3	> 8

го излучения были установлены на конференции государственных промышленных гигиенистов Армии США.

При определении максимально допустимого времени воздействия на глаза оператора учитывали следующие факторы: ультрафиолетовое излучение, вызывающее фотокератит; излучение, близкое к ультрафиолетовому ( $\lambda = 320...400$  нм), способствующее развитию катаракты вследствие термического ожога; фотохимическое поражение сетчатой оболочки (поражение «голубым светом»), вызывающее фоторетинит; термическое поражение сетчатой оболочки; инфракрасное излучение ( $\lambda = 770...3000$  нм), вызывающее термическое поражение роговой оболочки.

Рассчитанные значения дозы излучения и соответствующие им максимальное время воздействия на глаза с использованием астронавтом штатного солнцезащитного фильтра скафандра и без него приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, в случае применения солнцезащитного фильтра и при расстоянии от зоны сварки до глаз 30 см и больше уровень воздействия излучения сварочной ванны на глаза в течение 2 ч (предполагаемая продолжительность эксперимента в космосе) находится ниже предельно допустимых значений, и поэтому излучения не причиняют вреда глазам астронавтов.

Без солнцезащитного фильтра в космосе максимальное время воздействия, вызывающее фотохимическое поражение «голубым светом», составляет 1,25 ч. Уровень излучения, при котором происходит термическое поражение роговой оболочки и возможно развитие катаракты, также достигает почти половины допустимых пределов. Интенсивность света может затруднить наблюдение за процессом сварки. Поэтому американские специалисты Хонглу Ву, Арнольд В. Орсак в отчете NASA «Анализ вредного воздействия на глаза сварки в космосе» (13 сентября 1996 г.) рекомендуют применять солнцезащитный фильтр при сварке нержавеющей стали и титана.

**Высокое напряжение, возможность возникновения коронных и электростатических разрядов.** Потенциальную опасность представляет высокое (до 10 кВ) напряжение, которое используется при работе ЭЛП. Устранить этот фактор невозможно, поскольку высокое ускоряющее нап-

ряжение является обязательным условием работы электронно-лучевого прибора. Поэтому речь может идти только о безопасном конструктивном исполнении рабочего инструмента.

Электронный луч формируется между катодным узлом и анодом, роль которого выполняет наружный корпус ЭЛП.

В установках УРИ и «Универсал» высоковольтный трансформатор, его выпрямитель и трансформатор накала катодного узла объединены в моноблок с изоляцией из эпоксидного компаунда [8] и расположены непосредственно на рабочем инструменте. Низкое (до 100 В) переменное напряжение на входе анодного и накального трансформаторов позволяет отказаться от высоковольтного кабеля, что существенно повышает безопасность и надежность работы ручного инструмента. Высоковольтный блок располагается в металлическом корпусе, который вместе с анодом, наружным корпусом пушки и обрабатываемым изделием находится под одним электрическим потенциалом. Таким образом, высокий отрицательный электрический потенциал локализован и не представляет опасности для оператора. Надежный контроль прочности высоковольтной изоляции на этапе изготовления установки, а также испытания при крайних значениях электрического напряжения, температуры и давления окружающей среды практически исключают возможность электрических пробоев в высоковольтном блоке. Поскольку все наружные его части находятся под одним электрическим потенциалом, то даже при возникновении нештатной ситуации поражение оператора не произойдет, вероятен только отказ в работе ручного инструмента.

Особое внимание следует уделить надежному электрическому соединению корпусов всех частей комплекта аппаратуры, обрабатываемого изделия и экранов соединительных кабелей. Сопrotивление между этими элементами (особенно анод-изделие) не должно превышать 0,2 Ом. Это позволит исключить накопление электростатического заряда на обрабатываемом изделии.

По поводу возможного возникновения коронных разрядов в п. 3.4.9 объединенного документа NASA и PKA SSP 50094 (редакция А, март 2000 г.) написано следующее: «Электрические и электронные подсистемы, системы и оборудование, ко-

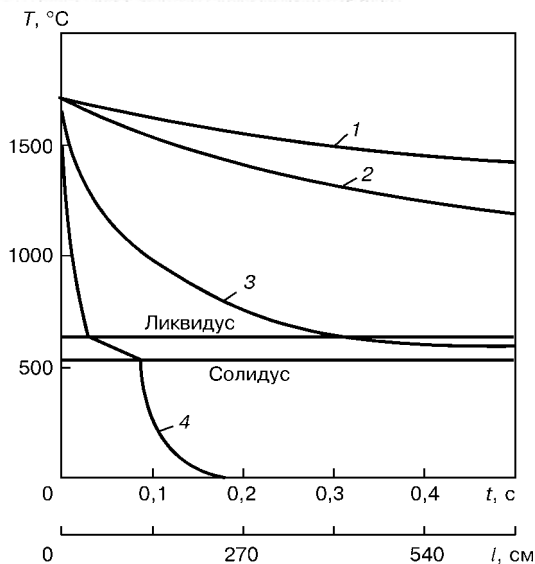


Рис. 6. Зависимость температуры частиц  $T$  и расстояния от сварочной ванны  $l$  от времени при сварке алюминиевого сплава 2219 (скорость частиц 10,5 м/с): 1 – диаметр частиц 250; 2 – 100; 3 – 10; 4 – 1 мкм

которые сами вырабатывают или используют в установленном или переходном процессах любые электрические напряжения, равные или больше 123 В, включая входные и выходные промежуточные внутренние напряжения, должны быть так сконструированы, чтобы предотвратить появление разрушающей или повреждающей короны в любой окружающей среде на МКС».

В рассматриваемом нами комплексе аппаратуры такое возможно только внутри ЭЛП между катодом и анодом при значительном ухудшении вакуума (менее  $5 \cdot 10^{-1}$  Па) в зоне рабочего инструмента. Это вызывает срабатывание защитной системы аппаратуры и отключение луча. Рабочее давление окружающей среды для нормальной работы ручного инструмента должно составлять не менее  $5 \cdot 10^{-2}$  Па. Возникновение электрического разряда между частями аппаратуры, а также между аппаратурой и частями космического объекта невозможно, поскольку все эти элементы находятся под одним электрическим потенциалом — потенциалом корпуса.

Тем не менее, при подготовке МЭСК были проведены испытания для проверки возможности возникновения коронных и дуговых разрядов во время выполнения сварки в открытом космосе. Согласно данным, полученным в ходе 39-го полета орбитального аппарата «шаттл», предполагаемое давление в зоне скафандра находится в пределах  $1 \cdot 10^{-4}$  Па с отдельными пиками до  $1 \cdot 10^{-2}$  Па. Проведенные расчеты показали, что натекание из скафандра может достигать  $5 \cdot 10^{-3}$  Па с отдельными пиками до  $1 \cdot 10^{-2}$  Па. Поэтому было решено в вакуумной камере при давлении  $1 \cdot 10^{-2}$  Па во время сварки с помощью генератора плазмы низкого давления и игольчатого натекавателя получить плазму при давлении плазмообразующего газа (аргона)  $5 \cdot 10^{-3}$ ,  $15 \cdot 10^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{-1}$  Па и в случае возникновения коронных или дуговых разрядов с помощью средств видеорегистрации зафиксировать их. Несмотря на то что во время испытаний давление

аргона было значительно выше и находилось в пределах  $(1...2) \cdot 10^{-1}$  Па (так как при меньших его значениях процесс образования плазмы неустойчив или вообще прерывается), наличие коронных или дуговых разрядов при проведении сварочных процессов зафиксировано не было. Поэтому аппаратура признана безопасной.

**Оценка воздействия возможных брызг расплавленного металла и других продуктов, сопутствующих ручной ЭЛС, на материал скафандра и элементы интерьера.** Электронно-лучевые технологические процессы сопровождаются выделением из сварочной ванны следующих продуктов: брызг расплавленного металла в виде частиц размером до 2 мм; частиц свариваемого металла или его компонентов в твердой или жидкой форме, вылетающих из сварочной ванны и наблюдаемых как искры размером 1...500 мкм; паров металлов, представляющих собой группы атомов размером менее 1 мкм. При подготовке МЭСК с выполненными американскими специалистами теоретическим анализом и расчетами был проведен также ряд испытаний и исследований для определения основных характеристик перечисленных частиц: измерение скорости частиц с помощью анализа видеозаписей, выполненных скоростной камерой; оценка их воздействия на образцы материалов скафандра и защитного снаряжения оператора; определение размеров и количества частиц. Для этого в процессе сварки каждого образца собирали все частицы, вылетающие из сварочной ванны, и под микроскопом измеряли их размеры, после чего строили статистические модели распределения.

Проанализировав данные видеозаписи сварки 223 образцов, выполненных из различных материалов, которые предполагались для использования в эксперименте, было установлено, что преимущественно искро- и брызгообразование происходит при сварке алюминиевых сплавов 2219 и 5456, в значительно меньшей степени — титанового сплава Ti-6Al-4V и практически отсутствует при сварке нержавеющей стали 304SS. При этом средняя скорость частиц, определенная по результатам скоростной видеосъемки, для алюминиевых сплавов составляла 10,5 м/с (максимально 17,9 м/с), а для титанового сплава — 18,2 м/с (максимально 33,0 м/с).

Полученная в результате термических расчетов зависимость температуры частиц алюминиевого сплава 2219 от времени с момента их отделения от сварочной ванны приведена на рис. 6. Как видно из рисунка, частицы размером 10 мкм и более могут попасть на снаряжение оператора при температуре 500 °С.

Для оценки воздействия частиц на материалы скафандра и защитного снаряжения оператора на расстоянии 300 мм от сварочной ванны располагались образцы из этих материалов (табл. 3).

Во время испытаний наблюдалось появление единичных прожогов образцов из полиэтилена и капрона при сварке алюминиевых сплавов 2219 и 5456, но не зафиксировано ни одного прожога при сварке титанового сплава.



**Таблица 3. Характеристики образцов материалов скафандров и защитного снаряжения**

Материал образца	Толщина, мм	Температура плавления (обугливания), °С
Полиэтилен	0,0375	113
Нейлон 6 (капрон)	0,0500	224
Каптон	0,0625	310...670
Тефлон	0,2425	320...610

Для определения количества и размеров частиц в процессе сварки каждого образца производился их сбор, для чего они отделялись и собирались с анода ЭЛП. На аноде устанавливали специальную ловушку, позволяющую собрать большинство частиц, вылетевших из сварочной ванны. В табл. 4 приведено общее количество частиц, собранных при сварке 26 образцов стыковых соединений длиной 175 мм каждый.

Размеры частиц при сварке алюминиевого сплава 2219, определенные на электронном микроскопе, представлены на рис. 7.

В результате проведенных исследований было установлено следующее:

1) электронно-лучевая сварка образцов сопровождается различным уровнем выделения частиц из сварочной ванны. Выделение частиц полностью отсутствует при сварке нержавеющей стали и достигает 126 частиц на один образец при сварке алюминиевого сплава 2219;

2) размеры частиц при сварке алюминиевых сплавов составляют  $d \leq 500$  мкм, а при сварке титанового сплава —  $d \leq 140$  мкм;

3) температура частиц на расстоянии 300 мм от сварочной ванны составляет  $\leq 500$  °С при сварке алюминиевых сплавов и  $\leq 1600$  °С для титанового сплава;

4) скорость выделения частиц при сварке соответственно алюминиевого и титанового сплавов равна  $v \leq 18$  и  $33$  м/с.

Для определения количества и состава продуктов, испаряющихся из сварочной ванны, использовали образцы-свидетели, расположенные на различных расстояниях от нее. Данные о максимальных значениях толщины покрытий и содержания в них основных элементов представлены в табл. 5.

Таким образом, при проведении испытаний появление крупных брызг расплавленного металла в виде частиц размером 1...2 мм зафиксировано не было. Сварка титанового, и особенно алюминиевых сплавов, сопровождается выделением большого количества мелких частиц, обладающих довольно высокими скоростью движения и температурой. Однако их размеры настолько малы, что повредить штатную одежду оператора (скафандр) они не могут, она будет только загрязнена, и поэтому при ручных ЭЛС следует использовать специальное снаряжение, защищающее скафандр. При проведении эксперимента по сварке в космосе сначала на борту американского орбитального кораб-

**Таблица 4. Количество частиц, собранных при сварке стыковых соединений образцов из различных материалов**

Материал образца	Количество образцов	Количество собранных частиц
Алюминиевые сплавы 2219	10	386
Алюминиевые сплавы 5456	6	123
Титановый сплав Ti-6Al-4V	6	33
Нержавеющая сталь 304SS	4	0

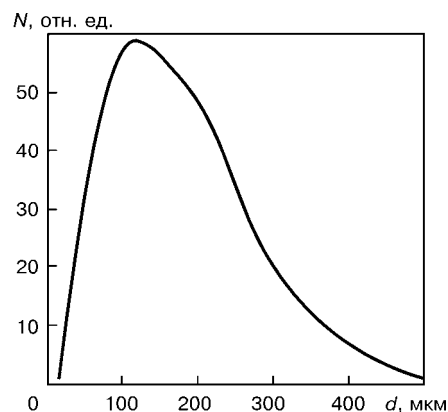


Рис. 7. Зависимость количества  $N$  частиц алюминиевого сплава 2219 от их размера  $d$

ля «шаттл» и затем российского ОК «Мир» предполагалось применение защитного сварочного снаряжения операторов. У американских астронавтов это должен быть легкосъемный костюм из тефлона (куртка и брюки) и сменный щиток поверх светофильтра из лексана (плексигласа), а у российских космонавтов — фартук из арамидной ткани (ТУ 17-04-08/3-457-94) и сменная защита гермошлема из фторопластовой пленки Ф10 (ТУ-2245-062-00203-521-2000). Макетные образцы такого снаряжения прошли испытания в бассейне гидроневесомости в США и барокамере АООТ «Звезда» (Россия). Результаты испытаний подтвердили пригодность и эффективность снаряжения.

**Горячие зоны.** При выполнении технологических операций, связанных с нагревом и плавлением металлов, к которым относится сварка и родственные с ней процессы, повышенную опасность для оператора, работающего в скафандре, представляют разогретые зоны свариваемых изделий, а также рабочий инструмент, нагревающийся в процессе функционирования.

Определение опасных зон при выполнении таких работ, оценка их температурных характеристик и выработка рекомендаций по безопасности осуществлялись при испытаниях в барокамерах

**Таблица 5. Максимальные значения толщины покрытий и содержания в них основных элементов**

Материал образца	Толщина покрытия, мкм	Массовая доля элементов, %					
		Mg	Si	Mn	Al	C	O
Алюминиевые сплавы 2219	—	—	35,9	—	—	7,1	57
Алюминиевые сплавы 5456	0,80	38,8	—	—	—	13,6	47,5
Титановый сплав Ti-6Al-4V	0,27	—	—	—	30,8	8,5	55,7
Нержавеющая сталь 304SS	0,25	—	—	25,2	—	20,6	51,0



**Таблица 6. Зависимость времени контакта руки оператора в перчатке от температуры элементов конструкций**

Температура элемента конструкции, °С	Время контакта, мин
+130	≥ 1
+100	≥ 2
+75	≥ 4
+50	> 30
-50	≥ 6
-75	≥ 4
-100	≥ 2
-130	≥ 1

как в автоматическом режиме, так и при участии оператора. Существуют определенные температурные ограничения для обеспечения безопасной работы оператора, снаряженного в скафандр. Так, по требованиям американских стандартов, которыми руководствовались в процессе подготовки к проведению МЭСК, при внекорабельной деятельности оператора температура поверхности, к которой может прикоснуться перчатка скафандра, ограничивается диапазоном  $-120...+113$  °С и временем 0,5 мин (стандарт NASA-STD-300/vol.1/rev.). Согласно протоколу 057-25/73-00, для российского скафандра «Орлан-М» при работе оператора на наружной поверхности МКС должно обеспечиваться определенное время для контакта руки в перчатке с элементами конструкции в зависимости от температуры элемента конструкции.

Наружный слой оболочки скафандра допускает кратковременный контакт с поверхностями, имеющими температуру  $\pm 150$  °С (табл. 6).

Максимальная температура при выполнении сварочных операций достигает и даже несколько превышает температуру плавления свариваемых металлов. Поэтому при организации рабочего места оператора необходимо выполнение комплекса конструкторских и методических мероприятий, благодаря которым исключается возможность случайного прикосновения оператора к свариваемому образцу или изделию при ограниченной подвижности.

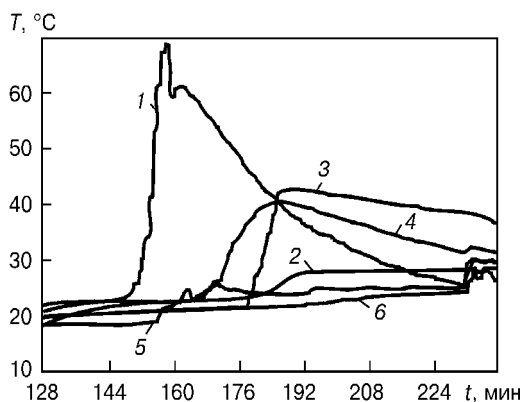


Рис. 8. Изменение температуры различных частей ручного электронно-лучевого инструмента при проведении испытаний в барокамере: 1, 3, 4 — датчики, расположенные на панелях барабана с образцами соответственно для пайки, сварки и резки; 2, 5, 6 — датчики, расположенные на защитном щитке соответственно с наружной, внутренней стороны, на рукоятке инструмента

Поскольку при проведении МЭСК как на борту орбитального аппарата «шаттл», так и ОК «Мир» предполагалось размещение свариваемых образцов на панелях поворотного барабана, изготовленного из алюминиевых сплавов и обладающих высокой теплопроводностью и теплоемкостью. Температура поверхностей панелей, к которым может прикоснуться оператор, оставалась невысокой. При проведении тренировок операторов в барокамере в процессе подготовки эксперимента по сварке на борту ОК «Мир» на панелях барабана с образцами и щитке инструмента было установлено шесть датчиков с максимальной температурой измерения 300 °С, контролирующих нагрев панелей при выполнении сварочных операций. Как видно из рис. 8, их максимальная температура не превышала 70 °С (кривая 1), а возле рукояток, с помощью которых оператор поворачивает барабан, — 30 °С (кривая 5).

Функционирование самого электронно-лучевого инструмента также сопровождается его нагревом за счет внутреннего тепловыделения расположенных в нем трансформаторов и излучения сварочной ванны, находящейся на незначительном расстоянии до образца в связи с использованием короткофокусной пушки. Максимальному нагреву подвергается ее корпус (анод) за счет излучения эмиттирующей поверхности катодного узла (температура эмиттера — более 1500 °С), а также рассеивания периферийной части потока электронов и торможения их на корпусе пушки. Поэтому температура анода может достигать 150...200 °С. В инструменте для нанесения покрытий вследствие теплопередачи тигля, несмотря на систему теплоизолирующих экранов, температура может составлять 350...400 °С. В связи с этим все ручные электронно-лучевые инструменты были снабжены специальными защитными экранами, исключая возможность случайного прикосновения оператора к разогретым до таких высоких температур частям инструмента (рис. 9). Как показали измерения при испытаниях в барокамере, температура на таких экранах не превышает 70...75 °С, а в зонах непосредственного длительного соприкосновения с перчаткой оператора (рукоятка, щиток и нижняя часть инструмента) — 40 °С (рис. 8, кривая 2).

Таким образом, проведенные испытания и тренировки в барокамере подтвердили, что для космонавта-сварщика в скафандре безопасно выполнение технологических операций нагрева и плавления металлов с помощью ручных электронно-лучевых инструментов. Для этого требуется только тщательная организация рабочего места, выполнение ряда конструкторских и методических мероприятий и надлежащий уровень подготовки оператора.

#### Электромагнитная совместимость и помехи.

Одним из важных видов испытаний аппаратуры, заявленной для участия в эксперименте по сварке в космосе, являлась оценка электромагнитных помех, включая оценку влияния работы аппаратуры на системы космического объекта и его полезную нагрузку, а также оценку влияния систем косми-





Рис. 9. Защитный экран ЭЛП ручного инструмента

ческого объекта на работу аппаратуры при проведении эксперимента.

Граничные требования, предъявляемые к аппаратуре, зависят от космического объекта, состава его полезной нагрузки и самой испытываемой аппаратуры. Конкретно рассмотрим комплекс «Универсал» при работе на орбитальном аппарате «шаттл».

Внешний вид оборудования при проведении испытаний по электромагнитной совместимости показан на рис. 10. Рабочий инструмент «Универсала» и водоохлаждаемая медная мишень располагались в вакуумной камере, представляющей собой стеклянный колпак диаметром 420 мм и высотой 700 мм. Ввод в камеру силового питания и охладителя, а также ее откачку осуществляли через основание — алюминиевую плиту толщиной 50 мм. Вакуумная камера располагалась в экранированном помещении и соединялась с наружным откачным агрегатом с помощью трубопровода с внутренним диаметром 150 мм и общей длиной около 2000 мм, поскольку по условиям испытаний размещать вспомогательное оборудование и приборы в экранированном помещении запрещалось. Вакуумный агрегат состоял из форвакуумного насоса со скоростью откачки 5 л/с и турбомолекулярного насоса со скоростью откачки 470 л/с и предельным вакуумом  $1 \cdot 10^{-6}$  Па. Уровень вакуума контролировался непосредственно на входе в откачный агрегат, в процессе испытаний он составлял  $1 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-3}$  Па.

Все требования к испытаниям и их методики были взяты из спецификации MSFC-SPEC-521B «Требования к электромагнитной совместимости полезной нагрузки и подсистем», за исключением предела узкополосного радиоизлучения. Его значения были взяты из последнего варианта документа ISD-2-10001 «Стандартные интерфейсы орбитального аппарата «шаттл» и груза». Перед проведением МЭСК на борту орбитального аппарата «шаттл» необходимо было убедиться, что МЭСК не вызовет электромагнитной интерференции с летательным аппаратом, полезными нагрузками, участвующими в полете и скафандром астронавта. Для этого были проведены следующие виды испытаний.

*Испытания на проводящее излучение.* Они были необходимы для подтверждения того, что пульсации и переходные процессы по напряжению, которые МЭСК наложит на силовую шину

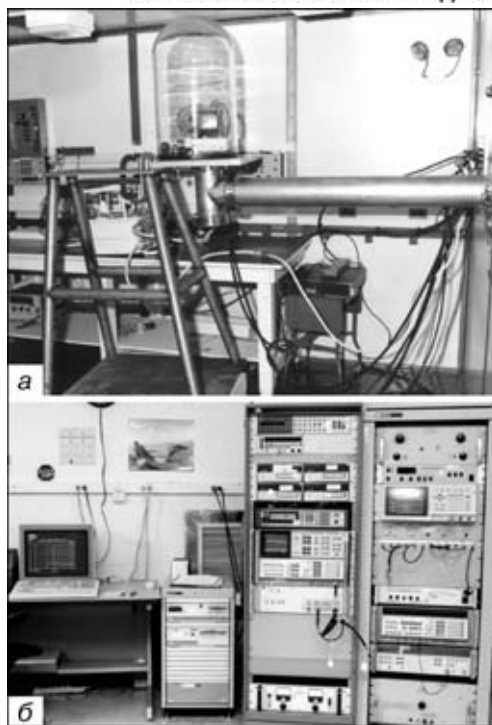


Рис. 10. Внешний вид оборудования при проведении испытаний по электромагнитной совместимости: а — вакуумная камера; б — комплекс измерительной аппаратуры

космического корабля «шаттл», не превысят допустимые значения и не вызовут электромагнитной интерференции между системами корабля и другими полезными нагрузками, подключенными к этой же силовой шине, включая следующие факторы: пульсацию напряжения в силовой шине постоянного тока по положительному и отрицательному полюсам в диапазоне от 0,03 до 20 кГц; то же по положительному и отрицательному полюсам в диапазоне от 0,02 до 50 МГц; переходные процессы в шине питания постоянного тока при включении-выключении аппаратуры.

При проведении испытаний были выявлены некоторые превышения предельно допустимых значений уровня проводящего излучения. Для устранения этих недостатков разработано и успешно испытано устройство электрического интерфейса с фильтром. Кроме того, отмечено, что необходимо подключать аппаратуру «Универсал» к отдельной силовой шине или отключать другие полезные нагрузки во время МЭСК.

*Испытания по излучению на радиочастотах.* Они проводились для проверки влияния электрических и магнитных полей аппаратуры МЭСК на электромагнитную среду орбитального аппарата, летающего кресла и других полезных нагрузок, включая узкий и широкий диапазоны радиоизлучения электрического поля на частотах  $14 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4$  ГГц, а также радиоизлучения магнитного поля на частотах 0,05... 50 кГц.

*Испытания на восприимчивость к проводящему излучению.* Они были необходимы для проверки стойкости или выявления восприимчивости аппаратуры МЭСК к пульсациям напряжения или переходным процессам по напряжению, которые могут появиться в силовой шине орбитального ап-

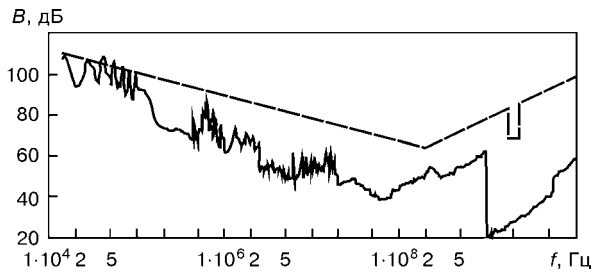


Рис. 11. Зависимость уровня излучения  $B$  аппаратуры «Универсал» от диапазона частот  $f$ : штриховая линия — допустимый уровень излучения

парата, а именно к пульсациям напряжения 4,2 В на входных шинах питания (положительной и отрицательной) в диапазоне частот 0,03... 50 кГц; к пульсациям напряжения на силовой шине постоянного тока (положительной и отрицательной) 0,2 В в диапазоне частот 0,05... 400 МГц. Аппаратура не должна проявлять чувствительность при тестовом сигнале с амплитудой  $\pm 56$  В продолжительностью 10 мкс. Переходный процесс применялся как к положительной, так и отрицательной шинам. Частота повторения составляла 10 импульсов в 1 с в течение 2 мин.

*Испытания на восприимчивость к радиоизлучению.* Проводились для выявления восприимчивости аппаратуры МЭСК к электрическим полям, которые могут быть частью электромагнитных условий на орбитальном аппарате в поддиапазонах радиочастот 0,014...  $10^4$  МГц при напряженности электрического поля 2 В/м, 1,7... 2,3 гГц — при 10 В/м и 13... 15 гГц — при 12 В/м.

Испытания показали следующие недоработки аппаратуры «Универсал»: недостаточное экранирование кабелей технологического блока, рабочих инструментов и двигателя механизма подачи посадочной проволоки (рис. 11).

Кабели были доработаны путем добавления общих экранов, надежно соединенных с двух сторон с корпусом изделия, что существенно снизило уровень излучаемых помех. Большое внимание уделено рабочим инструментам с подачей присадочной проволоки, так как при работе их двигателей создавались электромагнитные помехи на рабочих частотах радиоприемника-передатчика скафандра астронавта. Для устранения этого недостатка сделано дополнительное экранирование кабеля питания двигателя, самого двигателя, установлены проходные фильтры и надежно соединены все экраны с корпусом инструмента.

Эти доработки совместно с мероприятиями, проведенными после первого вида испытаний, дали положительные результаты, и аппаратура «Универсал» получила допуск на проведение космического эксперимента. Следует отметить, что предельные значения проводимых тестов зависят от типа орбитального аппарата, полезных нагрузок и точки подключения аппаратуры. Поэтому для существующей МКС следует руководствоваться документом NASA и PKA SSP 50094 п. 3.4 «Электромагнитная совместимость» (редакция А, март 2000 г.).

**Заключение.** Несмотря на применение в ручных электронно-лучевых инструментах коротко-

фокусной пушки, электронный луч на расстоянии до 0,5 м оказывает разрушающее воздействие при прямом попадании на все материалы скафандра и защитного снаряжения космонавта-сварщика. Поэтому для обеспечения безопасного выполнения технологических операций требуется проведение ряда конструкторских и методических мероприятий, исключающих возможность попадания луча на эти материалы, а также прикосновения оператора к свариваемым изделиям.

При использовании в ручных электронно-лучевых инструментах ускоряющего напряжения до 10 кВ радиационное излучение не превышает установленной нормы. Некоторую противоречивость полученных экспериментальных данных можно объяснить использованием различных методик и сложностью измерения интенсивности излучения низкоэнергетических источников.

Предполагается, что в будущем применение ручной сварки понадобится при возникновении аварийных ситуаций, а основной объем сварочных операций, по всей видимости, будет выполняться оператором с использованием гибких адаптивных робототехнических комплексов. Это позволит повысить мощность и ускоряющее напряжение ЭЛП, необходимые для обеспечения качества сварных соединений, однако потребуются контроль интенсивности радиационного излучения. При удаленности оператора на довольно небольшое расстояние от зоны выполнения любого экстремального технологического процесса, т. е. в зоне видимости и досягаемости обрабатываемого изделия, степень общего риска может быть сведена до минимума.

Судя по результатам проведенных испытаний, световое и инфракрасное излучения сварочной ванны при ручной ЭЛС не должны вызывать особого беспокойства. При сварке алюминиевых сплавов, которые в перспективе будут основными свариваемыми металлами в космосе, не требуется использование оператором дополнительных средств защиты, а те немногие проблемы, возникающие при сварке нержавеющей стали и титановых сплавов, полностью решаются при применении космонавтом-сварщиком штатного солнцезащитного фильтра. Кроме того, в настоящее время существуют разработки светофильтров переменной плотности на основе композитных жидкокристаллических материалов с очень высоким быстродействием [9, 10], которые могут использоваться для защиты глаз оператора.

Процесс ЭЛС намного «спокойнее» по сравнению с другими способами сварки с точки зрения брызгообразования [11]. Исходя из опыта подготовки МЭСК следует, что при должной технологической подготовке сварочных операций возможно практически полностью исключить образование брызг. Что касается процессов выделения из сварочной ванны мелких частиц, приводящих к загрязнению скафандра оператора, то можно говорить только о его минимизации. Поэтому при выполнении ручной электронно-лучевой сварки применение защитного сварочного снаряжения поверх скафандра является необходимой мерой безопасности.



Сварочная аппаратура, предназначенная для использования на космических объектах, должна создавать минимальный уровень различных помех (электромагнитных, по цепям питания и др.), не влияющий на функционирование служебных систем, и быть сама защищенной от помех. Проверка ее совместимости с этими системами, а также с другими возможными полезными нагрузками осуществляется в процессе комплексных испытаний.

Результаты проведенных испытаний нового поколения ручного электронно-лучевого сварочного оборудования — одного из штатных и необходимых инструментов для ремонтно-восстановительных работ в космосе, а также специальные тренировки космонавтов-сварщиков российских экипажей в обитаемой барокамере подтвердили возможность реализации экспериментальных и прикладных сварочных задач за бортом космического объекта.

1. *О возможности* ручной электронно-лучевой сварки в космосе / Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, В. Н. Бернадский и др. // Космическое материаловедение и технология. — М.: Наука, 1977. — С. 17–22.
2. *Испытание* ручного электронно-лучевого инструмента в открытом космосе / В. П. Никитский, В. Ф. Лапчинский, А. А. Загребельный и др. // Проблемы космичес-

кой технологии металлов. — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 7–15.

3. *Лакин Ю. Н., Гавриш С. С.* Устройство обеспечения безопасности работы в космосе ручным электронно-лучевым сварочным инструментом // Автомат. сварка. — 2001. — № 4. — С. 38–40.
4. *Булацев К. А., Булацев А. Р.* Система контроля за положением ручного электронно-лучевого инструмента // Там же. — 2001. — № 4. — С. 41–43.
5. *Система безопасности электронно-лучевого инструмента* / В. В. Точин, Б. И. Ющенко, П. П. Русинов и др. // Там же. — 2001. — № 4. — С. 44–45.
6. *ОСП-72-80.* Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений / М-во здравоохранения СССР. — М.: Энергоиздат, 1981. — 57 с.
7. *Test report for the assesment of ground-based personnel and crew exposure to X-ray radiation during electron beam welding using the international space welding experiment* / D. L. Edwards, C. C. Russell, M. R. Carruth, J. W. Noblin. (MSFC, Nov. 18, 1996). — 27 p.
8. *А.с. 206991, МПК В 23 К.* Устройство электронно-лучевой сварки / В. К. Лебедев, И. И. Заруба, В. Д. Шелягин и др. — Оpubл. 08.12.67; Бюл. № 1.
9. *Сморгон С. Л., Пресняков В. В., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф.* Устройство для поляризации и модуляции света // Приборы и техника эксперимента. — 1997. — № 1. — С. 164.
10. *Crawford G. P., Zumer S.* Liquid crystals in complex geometries. — London: Taylor & Francis publ., 1996. — 584 p.
11. *Мухайловская Е. С., Шульм В. Ф., Загребельный А. А.* Результаты экспериментов по ручной ЭЛС в обитаемой барокамере // Автомат. сварка. — 2002. — № 2. — С. 23–27.

Results of basic tests conducted to verify and establish safety of the "Universal" hardware in performing welding operations under the open space conditions and the possibilities of reducing the degree of risk are considered.

Поступила в редакцию 11.07.2002



## Международная выставка-ярмарка Сварка. Родственные технологии—2003

20.05–23.05.2003

«Международный выставочный центр»  
Броварской просп., 15, Киев, Украина

Міжнародна виставка-ярмарка  
«Зварювання. Споріднені технології—2003»  
Київ, 20.05–23.05.2003

International Fair  
«Welding. Related Processes—2003»  
Kyiv, 20.05–23.05.2003

Международная выставка-ярмарка  
«Сварка. Родственные технологии—2003»  
20.05–23.05.2003 г.

Организаторы выставки-ярмарки:



Научно-технический комплекс  
«ИЭС им. Е.О. Патона»



Общество сварщиков Украины



Экспоцентр «Наука»

При поддержке:

Национальной академии наук Украины,  
Министерства промышленной политики,  
Киевской государственной городской  
администрации,  
ЗАО «Международный  
выставочный центр»



При содействии

Программы развития ООН



Дополнительную информацию Вы можете получить в НТК «ИЭС им. Е.О. Патона»:

Tel: (38-044) 268-1254, 227-1238, 268-3523 Тел./факс: (38-044) 227-6502, 495-2616 expo@paton-expo.kiev.ua www.paton-expo.kiev.ua