



КОНДЕНСАТОРНАЯ ПРИВАРКА ШПИЛЕК В ВАКУУМЕ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, **Д. М. КАЛЕКО**, канд. техн. наук, **А. Р. БУЛАЦЕВ**, **В. Ф. ШУЛЫМ**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследований конденсаторной приварки шпилек из алюминиево-магниевого сплава АМг3 и нержавеющей стали 10Х18Н9Т в условиях среднего и высокого вакуума. Показано, что высокоэнергетический кратковременный импульсный разряд, при котором значительная часть испарившегося металла сохраняется в зазоре между свариваемыми поверхностями, может быть использован для стыковой приварки в вакууме деталей компактного сечения к листовому материалу. Экспериментально доказана возможность приварки шпилек диаметром до М6 при давлении 1,33 Па с прочностью на статический разрыв равной прочности материала шпильки.

Ключевые слова: конденсаторная сварка в вакууме, дуговой разряд, приварка шпилек, алюминиевый сплав, нержавеющая сталь, вольт-амперные характеристики, макро-структура, механические свойства

Футурологические исследования многих ученых однозначно показывают, что выживание человечества при ускоренном потреблении разного рода земных ресурсов возможно только при условии выхода в космическое пространство. Уже сегодня на Луне с помощью космических аппаратов найдены полезные ископаемые. Кроме того, отсутствие там атмосферной экранизации солнечного излучения дает возможность использовать неиссякаемую (в границах исторического времени) энергию Солнца для удовлетворения потребностей человека, которые увеличиваются в геометрической прогрессии.

В последние годы возобновились разговоры о целесообразности создания научных лабораторий на Луне и планетах Солнечной системы. В 2004 г. президент США представил новую космическую программу, в которой значительное место уделяется освоению межпланетного пространства. В соответствии с планами Администрации американские астронавты должны создать на поверхности спутника Земли станцию для работы там «в течение достаточно продолжительного времени».

Поэтому своевременным является утверждение [1] о том, что «космические корабли и станции, а также инфраструктура экспедиционных поселений на поверхности Луны, рассчитанные на долгосрочную эксплуатацию в условиях космоса, должны быть оснащены комплексами сварочной аппаратуры для выполнения монтажных и ремонтных работ при строительстве и эксплуатации объектов, а экипажи кораблей и экспедиций должны быть научены основам сварочных технологий и иметь практические навыки выполнения указанных работ».

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины накоплен большой опыт [2] по

сварке металлов в вакууме и невесомости, а также институт инициировал эксперименты по сварке металлов в открытом космосе на аппаратуре и по технологии, им разработанной. В ходе выполненных работ на листовом материале установлено [3], что по сравнению с электронно-лучевой все остальные способы сварки имеют недостатки, затрудняющие их использование в условиях космоса.

Однако условия монтажа на объектах космической техники и их ремонта в космосе требуют расширения номенклатуры привариваемых деталей крепежными элементами, из которых наиболее широко используют шпильки разного вида и конструкций.

Все отмеченное выше обуславливает интерес к проверке возможности получить в вакууме дуговой разряд в миллисекундном интервале времени. Именно эту продолжительность имеет приварка шпилек дугой, которая горит при разряде конденсаторов.

Авторам известна только одна работа [4] по приварке шпилек в условиях, имитирующих космическую среду. Эксперименты проводили со шпильками из алюминиевых сплавов А1 5000 (Al-Mg) и А1 2319 (Al-Cu), а также нержавеющей стали SUS 305 (12Х18Н12) диаметром М5. Условия вакуума были ограничены возможностями лабораторного оборудования, а именно 10^{-4} торр (13,3 Па). Ниже показаны существенные отличия между сваркой в низком и высоком (10^{-5} торр) вакууме. Поэтому предыдущий опыт не позволяет достоверно оценить возможность использования конденсаторной приварки шпилек в открытом космосе. Электрические характеристики процесса, численные показатели прочности и металлографические исследования сварных образцов не приведены в работе [4].

В качестве источника энергии в наших экспериментах использовали установку К747МВ, разработанную в ИЭС им. Е. О. Патона [5]. Вместо обычного сварочного пистолета использовали сварочную головку на штативе, которая распола-

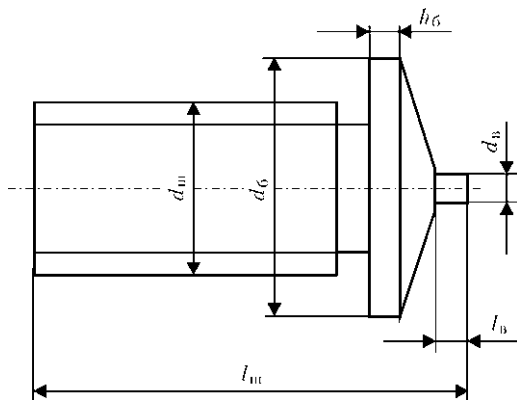


Рис. 1. Конструктивные размеры шпильки РТ для приварки разрядом конденсаторов

гальса в вакуумной камере, управлялась выносным пультом и выполняла те же операции, что и сварочный пистолет.

Эксперименты проводили со шпильками типа РТ диаметром М4 и М6 из АМг3 и 10Х18Н9Т, соответствующими ISO 13918 (рис. 1). Выбор материалов соответствовал условиям применения в космическом пространстве [6]. В соответствии со стандартом размеры шпильки не зависят от материала, из которого она изготовлена. Размеры шпильки диаметром М4 и М6 имеют следующие значения: $l_{ш} = 20$ мм; $h_{б} = 1,2$ мм; $d_{б} = 5,5$ мм и 7,5 (для М6); $d_{в} = 0,65$ мм (для М4) и 0,75 (для М6); $l_{в} = 0,55$ мм (для М4) и 0,80 (для М6).

Сварку в форвакууме (10^{-2} торр) и высоком вакууме вели на режимах, обеспечивающих получение прочного соединения при атмосферных условиях. В соответствии с ISO 14555:2006 соединение считается прочным, если выдерживает изгиб шпильки на 60° . Если стандартные испытания подтверждали сохранение прочности соединения, режим сварки считали удовлетворительным, проводили осциллографирование процесса (Textronix TDS2000B) и фоторегистрацию результатов испытания на изгиб.

Известны два основных метода конденсаторной приварки шпильки: с предварительным зазором и предварительным контактом [7]. Оба метода можно использовать для сварки нержавеющей стали, но алюминиевые сплавы хорошо свариваются только с предварительным зазором. Од-

Параметры режима сварки сплава АМг3 и стали 10Х18Н9Т

Материал	Диаметр шпильки	Напряжение зарядки, В	Длина начального зазора, мм	Усилие сжатия, Н
АМг3	М4	100	2,5	104,6
	М6	180	3,0	104,3
10Х18Н9Т	М4	120	2,2	104,9
	М6	140	2,0	105,0

Примечание. Во всех экспериментах емкость батареи конденсаторов составляла 96 мФ.

нако уже первые эксперименты в вакуумной камере показали, что методом с предварительным контактом даже в форвакууме не удастся получить стабильные прочные соединения шпилек М4 из стали 10Х18Н9Т. Анализ осциллограмм (рис. 2) показал, что при сварке с предварительным контактом продолжительность дуговой стадии разряда более чем в 2 раза превышает длительность горения дуги при сварке с предварительным зазором. Кроме того, и разрядный ток при первом способе значительно больше, чем при втором. Это приводит к тому, что за время горения дуги при сварке с предварительным контактом металл из зоны сварки в значительной мере испаряется и оставшегося объема недостаточно для создания прочного соединения. На такой характер процесса указывают и подрезы по периметру стыка.

Исходя из этого, все последующие эксперименты проводили методом конденсаторной приварки шпилек с предварительным зазором.

Параметры режима сварки исследуемых соединений приведены в таблице. Они сохранялись неизменными для условий сварки при атмосферном и низком давлениях с целью последующего сравнения характеристик дуги и сварных соединений.

При сварке шпилек из алюминиевого сплава значения тока (рис. 3) и напряжения (рис. 4) практически не зависят от давления воздуха. При сварке стальных шпилек в высоком вакууме увеличивается «инкубационное» время между первичным касанием деталей и «взрывом» тонкого выступа на торце шпильки, предназначенного для

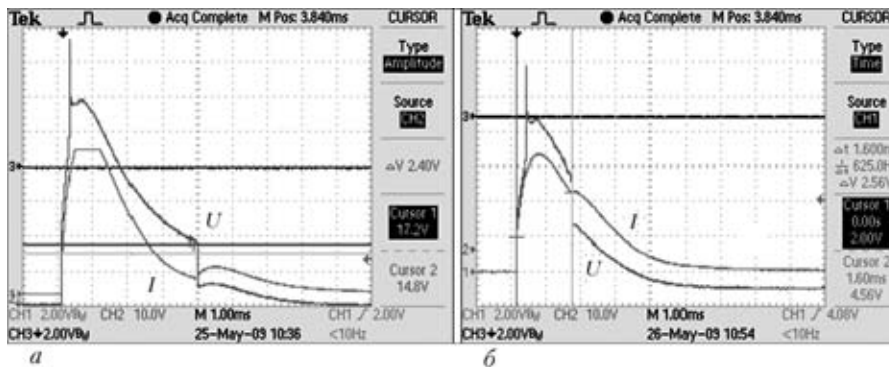


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения дуги при разряде конденсаторов в низком (10^{-2} торр) вакууме при сварке шпилек из стали 10Х18Н9Т диаметром М4 с предварительным контактом (а) и предварительным зазором (б) (напряжение зарядки конденсаторов 120 В, емкость 96 мФ)

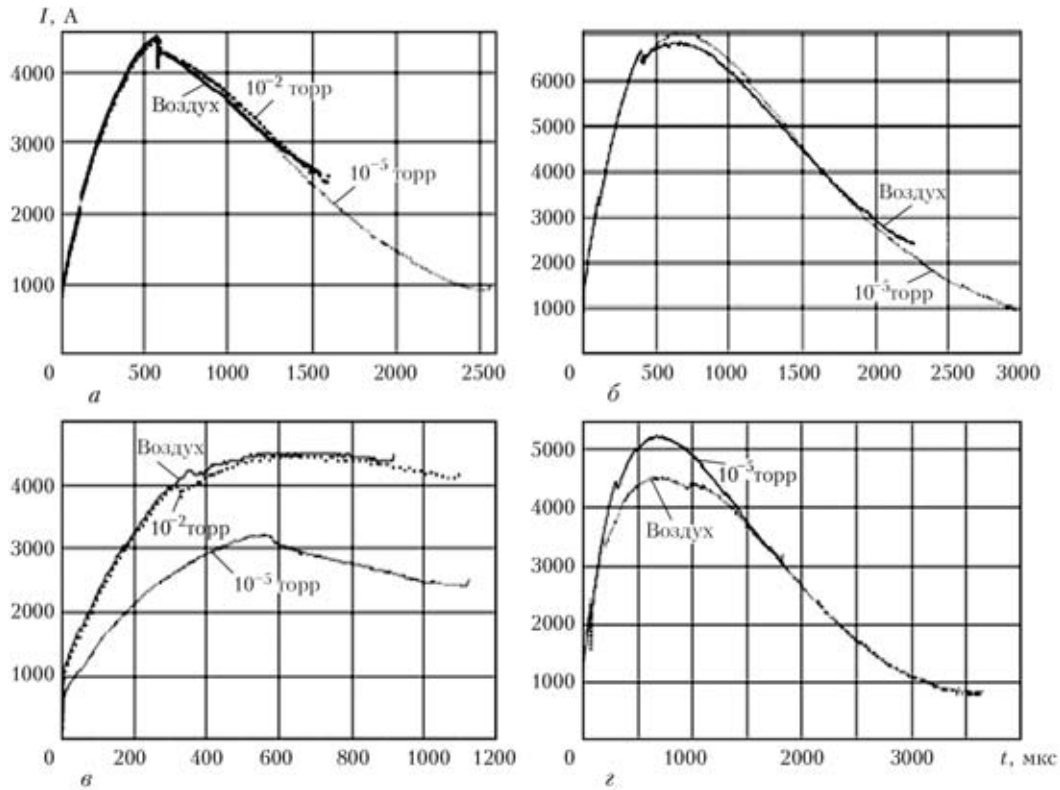


Рис. 3. Сварочный ток при конденсаторной приварке шпилек в условиях сварки при разных давлениях воздуха: а, б — сплав АМг3; в, г — сталь 10Х18Н9Т; а, в — М4; б, г — М6

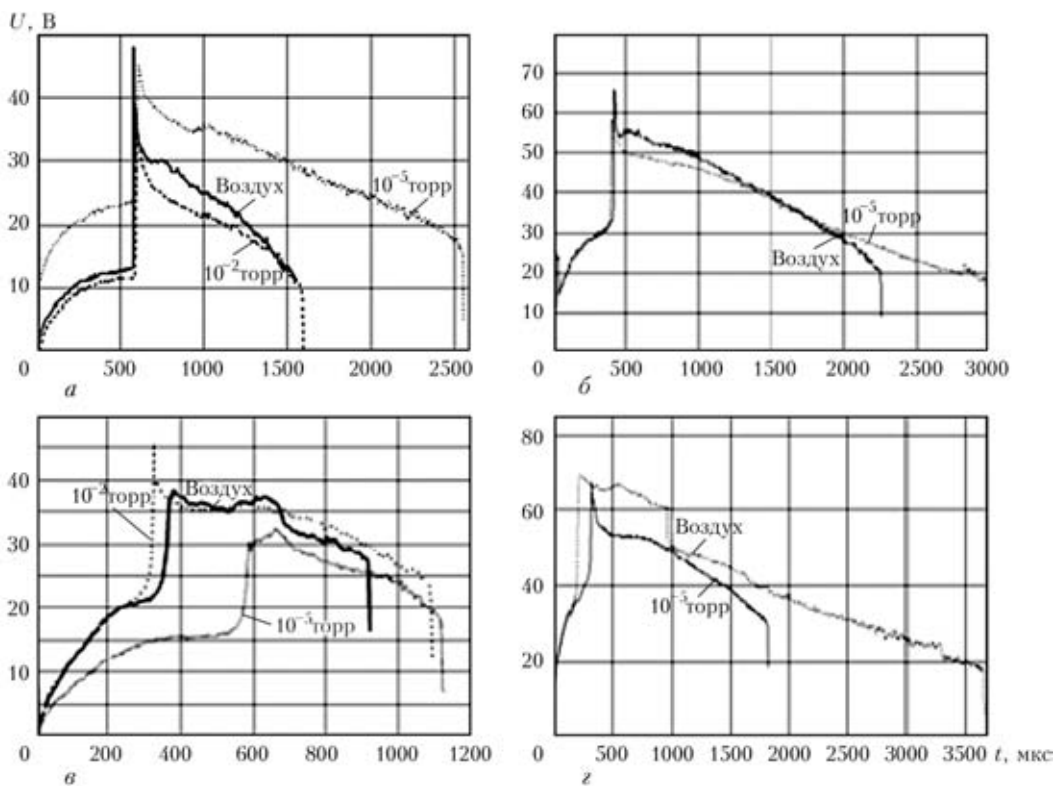


Рис. 4. Напряжение на свариваемых деталях: а-г — то же, что и на рис. 3

возбуждения дуги (момент «взрыва» отмечается снижением тока). Поскольку цепь разряда конденсаторов замыкается уже при слабом касании стыкуемых поверхностей, при начальном контак-

те взрывается микрорельеф и возбуждается дуга между торцом тонкого выступа и поверхностью листа, к которой должна быть приварена шпилька. О наличии дуги свидетельствует повышение нап-

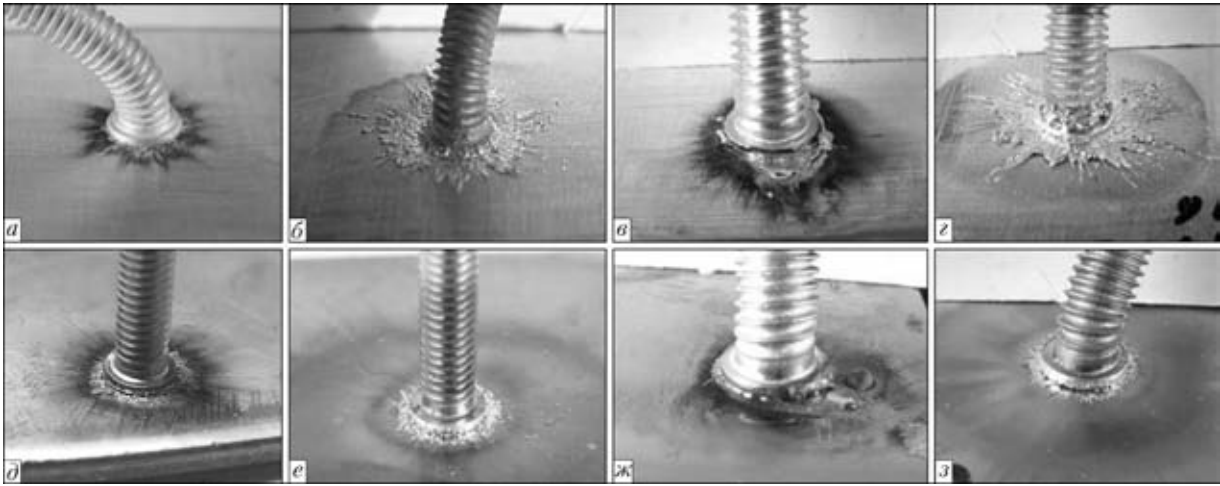


Рис. 5. Внешний вид сварных соединений шпилек из сплава АМг3 диаметром М4 (а, б), М6 (в, г) и стали 10Х18Н9Т диаметром М4 (д, е), М6 (ж, з), полученных при атмосферном давлении (а, в, д, ж) и в вакууме 10^{-5} торр (б, г, е, з)

ряжения свыше 10 В, что типично для дугового разряда.

Далее тонкий выступ нагревается двумя источниками — дугой на торце и проходящим током. Разлет паров начальной микродуги в вакууме приводит к снижению эффективной мощности дуги. Как показывают расчеты на основании данных осциллографирования, несмотря на увеличение «инкубационного» времени при сварке в вакууме по сравнению со сваркой при атмосферном давлении воздуха (шпилька М4, 588 и 366 мкс, соответственно), энергия, выделяемая на свариваемых деталях, к моменту перехода от микродугового к дуговому разряду примерно одинакова (49,2 и 50,9 Дж соответственно).

При приварке шпильки диаметром М6 из-за увеличения длины выступа в 1,5 раза по сравнению со шпилькой М4 (см. рис. 1) при незначительном увеличении диаметра существенно возрастает роль внутреннего источника нагрева проходящим током. К этому добавляется снижение теплоотвода от выступа в основное тело шпильки, что приводит к уменьшению продолжительности нагрева выступа до испарения по сравнению со шпилькой диаметром М4 (до 316 мкс в вакууме и 192 мкс при атмосферном давлении).

Однако при примерно одинаковых отношениях длительностей «инкубационного» периода при сварке шпилек диаметром М4 и М6 в воздухе и вакууме энергия, выделенная за это время на свариваемых деталях, существенно меньше при сварке шпилек диаметром М6 в воздухе (15,2 Дж) по сравнению со сваркой в вакууме (35,3 Дж), при которой снижение эффективной мощности микродуги компенсируется увеличением времени прохождения тока по тонкому выступу.

Сопротивление дуги во всех исследуемых условиях, кроме приварки стальных шпилек М6, повышается с уменьшением давления воздуха, что соответствует классическим представлениям об условиях горения дугового разряда в газовой сре-

де [8]. При приварке стальных шпилек диаметром М6 бурное испарение выступа вызывает кратковременное локальное повышение давления и разлет паров с высокой начальной скоростью, что приводит к укорочению времени горения дуги, определяемого продолжительностью выравнивания давлений в дуговом промежутке и пружины осадки сварочной головки (шпилька опускается на лист при их равенстве).

В остальных исследуемых вариантах продолжительность процесса сварки в вакууме больше, чем на воздухе. Это связано с тем, что вакуумирование при сварке алюминиевых шпилек вызывает увеличение напряжения горения дуги, что при неизменном токе приводит к интенсификации испарения. В эксперименте со стальными шпильками диаметром М4 увеличение длительности процесса (рис. 4) вызвано задержкой фазы возбуждения основной дуги вследствие снижения тока начальной дуги (см. рис. 3).

В соответствии с ISO 14555:2006 соединения с приваренными шпильками проверяются визуально на отсутствие подрезов, перерывов в сварочном валике и других видов несплошностей. Все полученные соединения отвечают требованиям стандарта. Как видно из рис. 5, главное отличие между соединениями, полученными при атмосферном давлении и в вакууме, заключается в увеличении в вакууме площади выплеска расплавленного металла из зоны сварки. Это можно объяснить уменьшением в условиях вакуума противодействия паров металла, демпфирующих удар шпильки по ванне расплавленного металла на поверхности листа под действием пружины сварочной головки. Об этом свидетельствует также ореол паров металла в виде плотного слоя оксидов на поверхности соединения, полученного при атмосферном давлении, и прозрачного, но большого диаметра слоя копоти при сварке в вакууме.

Как отмечено выше, все соединения, сваренные на оптимальном режиме, выдержали изгиб

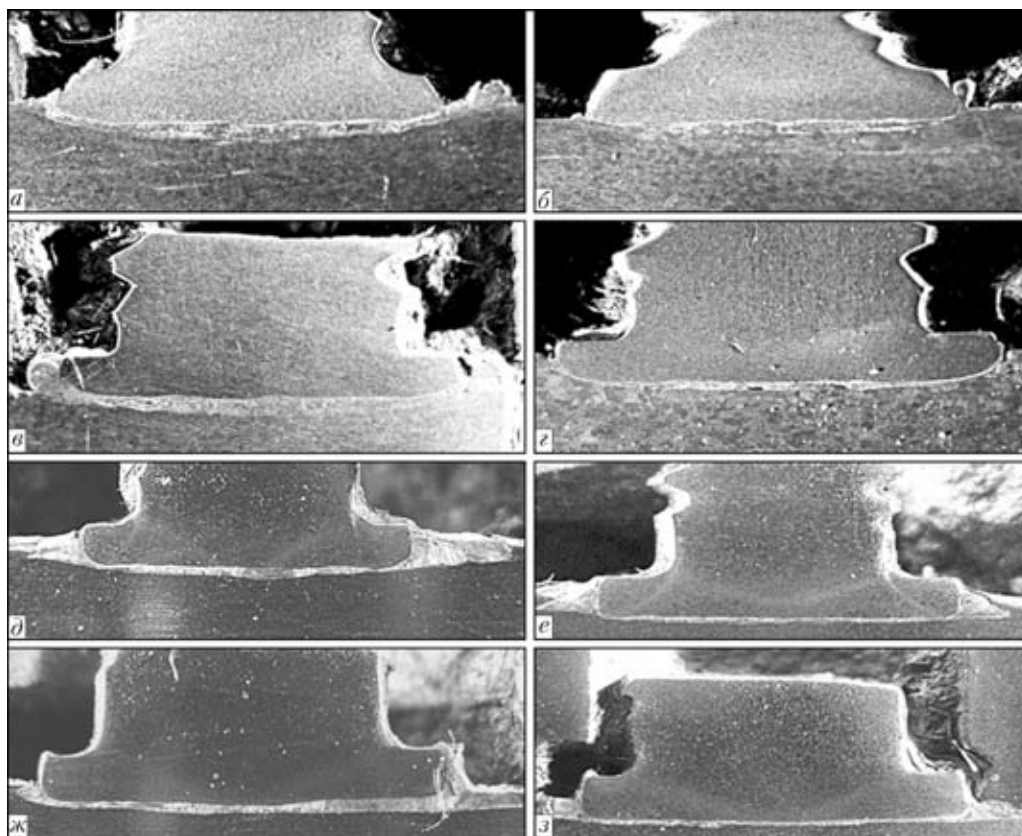


Рис. 6. Макроструктуры сварных соединений, полученных при атмосферном давлении (а, в, д, ж) и в высоком вакууме (б, з, е, з) шпилек из сплава АМг3 диаметром М4 (а, б), М6 (в, з) и стали 10Х18Н9Т диаметром М4 (д, е), М6 (ж, з) с листами алюминия и нержавеющей стали соответственно

на угол не меньше 60° . Испытание на статическое растяжение сварных соединений показало, что все они разрушались по основному металлу шпильки, вдали от места соединения.

Как показывают фотографии шлифов (рис. 6), толщина расплавленного металла, закристаллизовавшегося в стыке, уменьшается при переходе от атмосферного давления к высокому вакууму, несмотря на увеличенную в большинстве случаев продолжительность разряда при почти неизменном токе, т. е. выводы, сделанные из анализа внешнего вида образцов, подтверждаются.

Таким образом, эксперименты показали возможность приварки шпилек диаметром до М6 из алюминиевого сплава АМг6 и нержавеющей стали 10Х18Н9Т в вакууме дуговым разрядом конденсаторов. Полученные соединения равнопрочны с материалом шпильки.

Given are the results of investigations into capacitor-discharge welding of studs of aluminium-magnesium alloy AMg3 and stainless steel 10Kh18N9T under conditions of medium and high vacuum. It is shown that a high-current short-time pulsed discharge, at which the major part of evaporated metal remains in the gap between the mating surfaces, can be used for vacuum butt welding of compact-section parts to a sheet material. It was experimentally proved that up to M6 diameter studs can be welded at pressures of 1,33 Pa with a static tensile strength equal to that of the stud material.

1. Патон Б. Е. 25 лет сварке в открытом космосе // Автомат. сварка. — 2009. — № 7. — С. 3–7.
2. Космос: технология, материаловедение, конструкции: Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — 528 с.
3. Особенности и дальнейшее развитие сварки в космосе / В. Ф. Шулым, В. Ф. Лапчинский, Д. Л. Демидов и др. // Космос: технология, материаловедение, конструкции: Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — С. 52–59.
4. Masubuchi K., Imakita A., Miyake M. An initial study of remotely manipulated stud welding for space applications // Welding J. — 1988. — № 4. — P. 25–34.
5. Установка К747МВ для конденсаторной приварки шпилек / Д. М. Калеко, Б. И. Кононец, Н. Н. Оселедько и др. // Свароч. пр-во. — 1991. — № 6. — С. 25–27.
6. Патон Б. Е., Кубасов В. Н. Эксперимент по сварке металлов в космосе // Автомат. сварка. — 1970. — № 5. — С. 7–12.
7. Kaleko D. M., Lebedev V. K., Chvertko N. A. Processes of welding using the arc discharge of the capacitors // Welding and Surf. Rev. — 1999. — 13. — P. 1–148.
8. Капцов Н. А. Электрические явления в газах и вакууме. — М., Л.: Гостехтредиздат, 1950. — 836 с.

Поступила в редакцию 16.01.2012