

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СВАРКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ С МЕТАЛЛАМИ И МЕЖДУ СОБОЙ

Л. Я. БЕРЕЗИН, канд. техн. наук (Черниг. гос. технол. ун-т)

Приведены основные стадии процесса образования сварного соединения при сварке в электростатическом поле. Рассмотрены особенности процесса применительно к его проведению и выбору параметров режима сварки диэлектриков с металлами в твердой фазе, а также технические характеристики узлов, полученных сваркой в электростатическом поле.

Ключевые слова: сварка, электростатическое поле, диэлектрики, металлы, электроразрядные процессы, режимы сварки, особенности процесса, перспективность

Успешному решению вопросов разработки прогрессивных технологических процессов получения неразъемных узлов диэлектриков с металлами и между собой в радиоэлектронике, авиа-, ракето-, судостроении, а также в космической технике способствует сварка в электростатическом поле (СЭП) большой напряженности (рис. 1).

Исследование СЭП осуществляется уже несколько десятков лет в ряде стран мира. Наиболее значительных результатов достигли в США. В СНГ эти работы наиболее активно ведутся в России и Украине, в частности в ЧГТУ.

Научные исследования, проведенные на кафедре сварочного производства ЧГТУ, позволили достичь положительных результатов в получении неразъемных, вакуумплотных соединений ситаллов (например, марки СО-115М), неорганических стекол с металлами и между собой, выявить закономерности процесса СЭП, разработать ряд технологических процессов и соответствующее сварочное оборудование для изготовления узлов газоразрядных приборов [1]. При этом для разработки реальных технологических процессов использованы сочетания материалов, приведенные в табл. 1.

В основе СЭП лежат процессы поляризации диэлектрика или диэлектрического слоя на свариваемой поверхности металла (при сварке металла с ме-

таллом), нагретого до заданной температуры и помещенного в электростатическое поле большой напряженности. Эти процессы приводят к образованию слоя электрических зарядов высокой плотности на свариваемых поверхностях, пондеромоторному взаимодействию (ПМВ) между ними, образованию физического контакта, химических связей и последующему электрохимическому взаимодействию.

Установлено, что основной вклад в развитие и образование физического контакта вносят те виды поляризации диэлектрика, которые устанавливаются за время не более $1 \cdot 10^{-7}$ с. За этот период не менее чем на 97 % номинальной площади контакта успевает произойти образование физического контакта и химических связей. Дальнейшая выдержка свариваемого узла под напряжением способствует упрочнению соединения в основном за счет миграционной поляризации диэлектрика, продолжительность протекания которой и определяет длительность образования соединения с максимальной прочностью. В этот период реализуются процессы электродиффузии, электрохимических реакций, приводящих к образованию переходного слоя между свариваемыми материалами, характеризующегося совершенно новыми свойствами и более высокими значениями прочностных характеристик [2].

Процесс сварки может проводиться в любой газовой атмосфере: воздухе, защитных газах, вакууме. В общем случае процесс сварки осуществляется при нормальных атмосферных условиях. Необходимость использования того или иного защитного

Таблица 1. Сочетания свариваемых материалов

Сочетание свариваемых материалов	Прослойка	Толщина прослойки, мм	ТКЛР·10 ⁻⁷ , К ⁻¹
СО-115М–Al	–	≤ 3*	СО-115М–2(2,5...6,0) при 323...693 К;
SiO ₂ –Al–СО-115М	Al	0,001	SiO ₂ –(4...5,8) при 232...723 К;
СО-115М–Al–СО-115М	Al	0,5...1,0	Al–276,8 при 293...773 К;
СО-115М–Al–Cu	Al	<0,8	Cu–170,0 при 293...393 К
СО-115М–Al–СО-115М	Al	0,001	

Примечания. 1. Здесь SiO₂ — кварцевое стекло типа КВ (ГОСТ 15130–79); СО-115М (ОСТ 3-104–77); Al — А999 (ГОСТ 11069–74). 2. Звездочкой обозначена толщина детали из алюминия.

Березин Леонид Яковлевич — выпускник ЧФ КПИ 1973 г., доцент кафедры сварочного производства, зам. декана технологического факультета.

© Л. Я. Березин, 2001

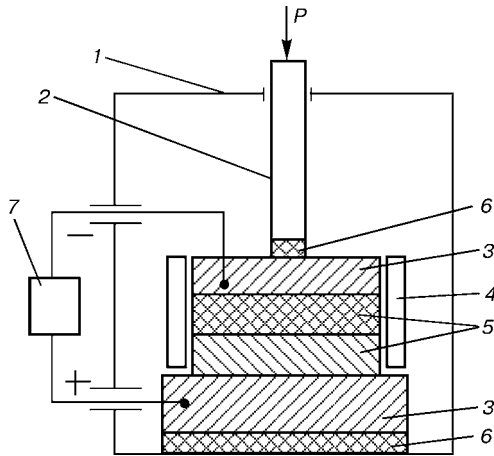


Рис. 1. Принципиальная схема СЭП: 1 — вакуумная камера (при сварке в вакууме или в защитных газах) или электрод (при сварке в воздухе); 2 — шток для передачи механического усилия (сварка без внешнего усилия сжатия); 3 — электроды; 4 — устройство для нагрева свариваемых деталей (радиационный нагрев); 5 — свариваемые детали; 6 — изоляторы; 7 — высоковольтный источник питания

газа или их смеси, а также вакуума определяется свойствами свариваемого металла (повышенной способностью взаимодействовать с кислородом и азотом воздуха, характером пленок, образующихся на свариваемой поверхности). Например, сварку меди с неорганическим стеклом и ситаллами необходимо проводить в вакууме для исключения образования на поверхности меди рыхлой пленки оксида меди.

Исследования показали, что образованию соединения при СЭП препятствуют электроразрядные процессы (ЭРП), протекающие на поверхностях свариваемых деталей и в зазорах между ними [3].

Развитие ЭРП в плоскости сварки сопровождается появлением локальных объемов с избыточным давлением, вызывающих образование между металлом и диэлектриком воздушных «пузырей» (непроваров), в зоне которых находятся следы разрядов — прожоги. В воздушном зазоре («пузыре») образуется ионный слой газовых молекул, который, находясь у поверхности диэлектрика, частично компенсирует его поверхностные заряды, образовавшиеся при поляризации диэлектрика, ослабляет интенсивность ПМВ и способствует раскрытию микротрещин на свариваемой поверхности стекол и ситаллов.

Развитие ЭРП в зазорах у катода приводит к появлению поверхностных токов и частичных разрядов по диэлектрику, шунтирующих его. Кроме того, существенно снижается качество полированной поверхности свариваемого диэлектрика, контактирующей с катодом (рис. 1, верхний электрод), из-за электроэрозии. С этой точки зрения среда, в которой происходит процесс СЭП, должна соответствовать определенным требованиям электрической прочности (влажность не более 55 %, отсутствие в зоне сварки легкоионизирующихся частиц и т. д.).

Одним из обязательных условий получения качественного сварного

соединения при СЭП является предварительная обработка свариваемой поверхности диэлектрика (механическая и химическая). Перед сваркой эта поверхность подвергается полировке до получения заданной шероховатости. Так, например, при сварке ситалла СО-115М с алюминием шероховатость поверхности ситалла должна быть не более $R_a = 0,02$ мкм [4]. Шероховатость поверхности диэлектрика (в общем случае зазор между свариваемыми поверхностями) на момент подачи электрического напряжения определяет характер ПМВ и ЭРП.

Предварительная химическая обработка поверхности диэлектрика в органических растворителях и неорганических растворах, кроме собственно очистки, позволяет получить заданные свойства как самой поверхности, так и приповерхностного слоя. Так, исследование 26 вариантов однократной и 20 вариантов комбинированной очистки ситалла СО-115М перед сваркой с алюминием показали, что максимальной прочности соединения достигают при комбинированной очистке ситалла в следующей последовательности: ацетон, неорганический раствор с основными свойствами, хромовая смесь. Это связано не только с эффективной очисткой, но и с активизацией процесса установления химических координационных связей между металлом и диэлектриком путем повышения кислотности поверхности неорганического стекла или ситалла, а также с активизацией процесса окислительно-восстановительной реакции между свариваемыми поверхностями с последующим образованием сложных соединений оксидов.

Кроме того, обработка неорганических стекол и ситаллов в кислых средах на заключительной стадии очистки ослабляет интенсивность ЭРП в зазорах зоны сварки, что выражается в уменьшении количества прожогов и непроваров в плоскости сварки, а также в более высокой воспроизводимости результатов экспериментов.

К параметрам режима СЭП следует отнести полярность, температуру нагрева (сварки) $T_{св}$, подаваемое на свариваемую сборку электрическое напряжение (напряженность электростатического поля между электродами $E_{св}$), скорость подачи напряжения, время выдержки под напряжением $\tau_{св}$, уровень и характер проходящего через диэлектрик тока (плотность тока $\gamma_{св}$), скорость нагрева и охлаждения, внешнее усилие сжатия $P_{св,уд}$. Диапазоны основных параметров режима сварки для ряда сочетаний свариваемых материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Диапазоны основных параметров режима сварки

Сочетание свариваемых материалов	$T_{св}$, К	$E_{св} \cdot 10^4$, В·м ⁻¹	$\gamma_{св} \cdot 10^{-3}$, мА·мм ⁻²	$\tau_{св}$, мин	$P_{св,уд}$, МПа
Co-115M-Al	623...723	18...20	2...3	5...10	10...25
SiO ₂ -Al-CO-115M	453...473	19...20	1,5...3,0	20...40	1...10
CO-115M-Al-CO-115M	623...723	18...20	2...3	5...10	10...25
CO-115M-Al-Cu*	623...723	18...20	2...3	5...10	10...25
CO-115M-Al-CO-115M	453...473	19...20	1,5...3,0	20...40	1...10

* Медь бескислородная.

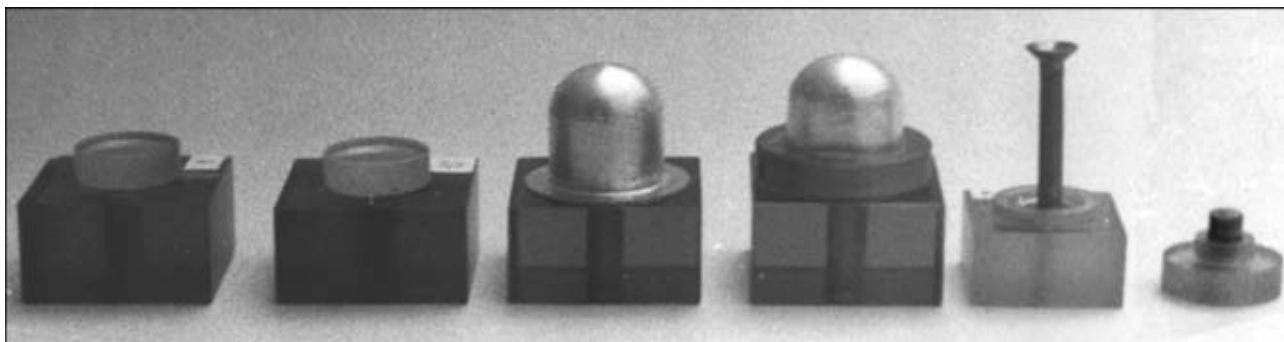


Рис. 2. Узлы газоразрядных приборов, выполненные способом СЭП

Критериями при выборе температуры сварки является сохранение конструктивных, технологических и эксплуатационных свойств свариваемых деталей, а также обеспечение полноты протекания процессов, ответственных за образование сварного соединения. Значение $T_{св}$ должно быть на 30... 50 К выше температуры начала поляризации диэлектрика и в общем случае составлять $(0,2... 0,4)T_{пл}$, где $T_{пл}$ — температура плавления наиболее легкоплавкого из соединяемых материалов.

Подаваемое на свариваемую сборку электрическое напряжение (напряженность электростатического поля между электродами) в основном зависит от диэлектрических свойств соединяемых диэлектриков, их толщины и должно обеспечивать протекание процессов, ответственных за образование сварного соединения. В общем случае, чем больше $E_{св}$, тем ниже температура и меньше время сварки.

Время выдержки под напряжением (время сварки) определяется теми процессами, протекание которых приводит к образованию неразъемного соединения. Причем образование физического контакта и установление химических связей определяется временем установления безынерционных видов поляризации (доли секунды). Развитие объемного взаимодействия с участием электродиффузионных и электрохимических процессов определяется временем реализации инерционных видов поляризации (в частности миграционной) и составляет от нескольких до десятков минут (в зависимости от диэлектрических и химических свойств свариваемого диэлектрика).

Установлено, что подача на свариваемые материалы напряжения после достижения температуры сварки и увеличение скорости его установления снижает влияние ЭРП, усиливает интенсивность поляризационных процессов и способствует повышению прочности соединения. Кроме того, прочность сварного соединения зависит от интенсивности и соотношения скоростей нарастания поляризационных процессов в диэлектрике и электроразрядных процессов в микрозазорах плоскости сварки.

Уровень и характер проходящего через диэлектрик тока (плотность тока) определяется его диэлектрическими свойствами, в частности диэлектрической проницаемостью, и температурой сварки. Для развития ПМВ, обеспечивающего получение качественного сварного соединения, диэлектрическая проницаемость должна составлять не менее 6, а плотность тока при выбранной температуре сварки

— не менее $1,0 \cdot 10^{-3}$ $\text{мА} \cdot \text{мм}^{-2}$. Для сварки используют постоянный ток.

Полярность тока оказывает существенное влияние на качество соединений. При сварке металлов с диэлектриками положительный потенциал необходимо подавать на металл. В общем случае это связано с эмиссионной способностью поверхности материала в плоскости сварки, находящимся под отрицательным потенциалом. Подача отрицательного потенциала на материал с большей эмиссионной способностью (например, алюминий в случае сварки с ситаллом) при наличии микрозазоров в плоскости сварки в момент включения напряжения приводит к активизации ЭРП и уменьшению прочности.

Уровень внешнего усилия сжатия не является определяющим при СЭП. Образование физического контакта между свариваемыми материалами происходит благодаря ПМВ. В таких условиях внешнее усилие сжатия может рассматриваться как интенсифицирующий фактор, способный повысить прочность соединения до 40 % и обеспечить получение вакуумплотных соединений диэлектрик-алюминий при толщине последнего до 3 мм. Основное требование к внешнему усилию сжатия заключается в устранении зазора между свариваемыми материалами до подачи на сборку электрического напряжения. Это существенно усиливает процесс разделения зарядов в диэлектрике и последующее ПМВ. Если развитие ЭРП в плоскости сварки может быть предупреждено иным путем (например, путем использования прослоек из алюминия толщиной примерно 0,001 мм и скорости нарастания поляризационных процессов выше скорости развития ЭРП

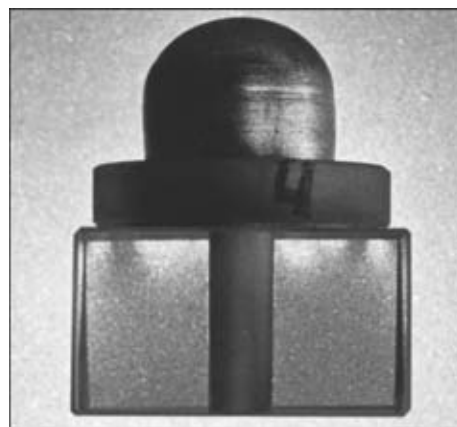


Рис. 3. Поляризационно-оптическое обследование узлов (уровень остаточных напряжений в зоне сварки 0,5 МПа)

в микрозазорах), процесс может осуществляться и без внешних сжимающих нагрузок или они будут носить «фиксирующий» характер (предотвращать смещение заготовок при сварке).

Кроме того, установлена зависимость прочности сварного соединения (интенсификации процесса разделения зарядов в диэлектрике) от усилия сжатия и модуля упрочнения алюминиевой прослойки.

Перспективность СЭП базируется на результатах, полученных при ее использовании для изготовления узлов газоразрядных приборов (рис. 2). По назначению и материалам свариваемых узлов она сопоставима с диффузионной сваркой в вакууме, но позволяет поднять процесс сварки неметаллов с металлами и между собой на значительно более высокий технико-экономический уровень:

качественные сварные соединения разнородных материалов в твердой фазе при различии ТКЛР до 46 раз;

низкий уровень остаточных напряжений в зоне сварки. Результаты поляризационно-оптического обследования показали, что остаточные напряжения в зоне сварки составляют не более 0,4... 0,8 МПа (рис. 3);

стойкость к механическим ударам и вибрациям; стойкость к термоударам при $-60...+120$ °С (213... 393 К);

вакуумплотность при чувствительности течей катоды не менее $1 \cdot 10^{-9}$;

обеспечение самых строгих требований по прецизионности;

увеличение выхода годных изделий на 20 %;

снижение температуры сварки на 200... 250 К;

повышение температуры эксплуатации узлов не менее чем на 150 К;

повышение качества сварных узлов до 50 %;

снижение стоимости сварочного оборудования до четырех раз.

Выводы

1. Сварка в электростатическом поле является перспективным способом получения вакуумплотных, прецизионных узлов из материалов с резким различием физико-химических свойств, удовлетворяющих самым жестким эксплуатационным требованиям.

2. Практическое использование указанных особенностей процесса и рекомендаций по выбору режимов сварки позволяет определить оптимальные условия для получения качественного сварного соединения, полученного сваркой в электростатическом поле.

1. Березин Л. Я., Панаев В. Г., Усышкин О. Г. Получение вакуумплотных соединений ситалл-алюминий в узлах приборов // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. — 1986. — № 1. — С. 23–25.
2. Котельников Д. И., Березин Л. Я. Роль электроразрядных процессов при получении неразъемных соединений металлов с неметаллами в электростатическом поле // Электронная обработка материалов. — Саратов, 1991. — С. 64–66.
3. Березин Л. Я., Панаев В. Г., Усышкин О. Г. Особенности предварительной подготовки к сварке ситалла с алюминием в узлах приборов // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. — 1987. — № 3/4. — С. 31–33.
4. Варенцов В. А., Коржавый А. П., Бритун В. Ф. Исследование границы электроадгезионных соединений некоторых материалов электронной техники // Электронная техника. Сер. 7. Материалы. — 1983. — Вып. 185. — С. 36–39.

The main stages of the process of formation of a welded joint in welding in an electrostatic field are described. Peculiarities of the process, as applied to its implementation and selection of parameters for welding dielectrics to metals in a solid state, as well as specifications of the assemblies made by electrostatic field welding, are considered.

Поступила в редакцию 05.04.2001,
в окончательном варианте 13.06.2001