

ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛОСТЕКЛЯННЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ГЕРМЕТИЧНЫХ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕХОДАХ

В.В. Лгалов¹, С.А. Зайдес²

¹ПАО «Иркутский релейный завод», 664075, Иркутск, ул. Байкальская, 239

E-mail: lgalovvv@irzirk.ru

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83

E-mail: zsa@istu.edu

Техника, работающая в сверхвысококачастотном диапазоне (СВЧ), широко применяется в радиолокации, радиовещании, телевидении, телеметрической связи, радиоастрономии, ядерной физике, сотовой телефонной связи, промышленности [1].

В условиях Иркутского релейного завода (ИРЗ) освоен выпуск микроминиатюрных соединителей и переходов типа SMP. Они применяются в радиоэлектронной аппаратуре СВЧ (РЭА СВЧ) для компактного соединения внутри СВЧ-модулей и между ними. Переходы с повышенной степенью герметичности обеспечивают механическое и электрическое соединение радиочастотных кабелей между собой или с микрополосковой линией [1]. Требования к герметичности РЭА СВЧ предъявляются в случае, когда прибор должен быть устойчивым к климатическим и биологическим воздействиям.

На ИРЗ производятся два типа герметичных СВЧ переходов:

1. Переход герметичный микрополосковый СРГ-50-972В (рис.1,*a*);
2. Переход герметичный вилка-вилка СРГ-50-974В (рис.1,*b*).



Рис. 1. Переход герметичный микрополосковый СРГ-50-972В (*a*); вилка-вилка СРГ-50-974В (*b*)

Герметичность переходов СРГ-50-972В и СРГ-50-974В определяется скоростью натекания гелия при испытании на течеискателе. Согласно техническим условиям (ТУ) она не должна превышать $1,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$. Указанная степень герметичности достигается при использовании в качестве изолятора между втулкой (корпусом) и токовыводом специального изолятора из стекла, спаянного с ними. Такое соединение деталей называется вакуумноплотным металlostеклянным спаем. При изготовлении СРГ-50-972В и СРГ-50-974В применяется согласованный спай сплава 29НК (ковар) ГОСТ 10994-74 и боросиликатного стекла С52-1 ОСТ 11 027.010-75.

Некоторые трудности представляет собой количественная оценка качества исполнения радиокомпонентов. Основными параметрами сверхвысокочастотного перехода являются:

1. Волновое сопротивление. Его стандартная величина в РЭА СВЧ – 50 Ом, определяется геометрическими размерами линии и диэлектрической проницаемостью изоляции. Для типичного случая линии круглого сечения его находят как [2]:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \lg \frac{D}{d}, \quad (1)$$

где D и d – размеры линии, мм; ε – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

2. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН). Согласно ГОСТ 23769-79 определяется как отношение напряженности электрического поля в максимуме к напряженности электрического поля в минимуме стоячей волны прибора СВЧ. Является основным параметром для СВЧ соединителей и переходов, может быть вычислен из выражения:

$$K_{cmU} = \frac{U_{max}}{U_{min}}, \quad (2)$$

где U_{max} и U_{min} соответственно максимальное и минимальное напряжение в линии передачи. По его величине можно с достаточной степенью точности оценить качество исполнения перехода. Согласно ТУ на СРГ-50-972В и СРГ-50-974В коэффициент стоячей волны по напряжению в рабочем диапазоне частот от 0 ГГц до 18 ГГц не должен превышать значения 1,35. На ИРЗ величина K_{cmU} измеряется с помощью векторного анализатора цепей *Anritsu VectorStar MS4644A*, и у большей части производимых переходов не превышает 1,2.

3. Прямые потери. Величина, характеризующая на сколько ослабляется сигнал при прохождении через СВЧ-компонент. Определяется ГОСТ 23769-79 как отношение входной мощности прибора СВЧ к выходной при отсутствии электронного потока в приборе. Также для оценки потерь возможно использовать коэффициент затухания на единицу линии дБ/м:

$$\alpha = \frac{1,98 \cdot 10^{-5} \sqrt{ef}}{\lg \frac{D}{d}} \left(\frac{\sqrt{\mu_1 \rho_1}}{d} + \frac{\sqrt{\mu_2 \rho_2}}{D} \right) + 9,08 \cdot 10^{-8} f \sqrt{\varepsilon} \cdot tg\delta, \quad (3)$$

где D и d – размеры линии, мм; ρ_1 и ρ_2 – удельное электрическое сопротивление металлов соответственно внутреннего и наружного проводников линии, Ом·мм²/м; μ_1 и μ_2 – относительные магнитные проницаемости этих проводников; ε – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции [2]. Согласно ТУ на герметичные переходы, выпускаемые ИРЗ, прямые потери $\alpha_{пр}$ не должны превышать 0,35 дБ.

К основным технологическим факторам, оказывающим влияние на величину КСВН при производстве СРГ-50-972В и СРГ-50-974В, относятся:

1. Точность изготовления втулки и токовывода;
2. Состояние поверхности втулки и токовывода, ее микро-, макрорельеф;
3. Точность позиционирования токовывода, относительно втулки;
4. Качество металлостеклянного соединения: наличие в спае и изоляторе газовых пузырей, инородных включений, наплывы стекла на втулку и токовывод;
5. Наличие менисков на торцах стеклянного изолятора после спаивания;
6. Качество нанесения покрытия: отсутствие шелушения и отслаивания, стабильность толщины.

Очевидно, что качество металлостеклянного соединения оказывает существенное влияние на параметры переходов. В [2] отмечается, что на высоких рабочих частотах стеклянный изолятор вносит наибольшую долю в высокочастотные потери коаксиально-микрорельефных переходов, т.к. диэлектрические потери преобладают над потерями проводимости. При этом любые неоднородности в стеклянном изоляторе повышают величины диэлектрической проницаемости среды и тангенса угла диэлектрических потерь, что ведет к увеличению потерь

СВЧ (3).

Обратимся к табл.1, где приведены основные виды брака металлостеклянных соединений, встречающегося при изготовлении СРГ-50-972В и СРГ-50-974В и его влияние на параметры этих переходов.

Таблица 1

Виды брака металлостеклянных спаев и его влияние на качество переходов

Вид брака	Вредное воздействие
Наплывы стекла на токовывод и втулку перехода	Повышение КСВН и потерь, ухудшение условий сборки и монтажа перехода
Газовые пузыри в спае	Повышение КСВН и потерь, нарушение герметичности спая, увеличение вероятности пробоя изоляции
Трещины и сколы стекла	Нарушение герметичности спая, увеличение вероятности пробоя изоляции
Неспаянные участки (отверстия в стекле)	Повышение КСВН и потерь, нарушение герметичности спая
Нарушение взаимного расположения поверхностей	Повышение КСВН и потерь, ухудшение условий сборки и монтажа перехода

В технической литературе [3,4] существует описание методов борьбы с указанными в табл.1 дефектами. Однако, они носят общий характер и требуют адаптации под условия производства. Кроме того, технические требования к металлостеклянным соединениям изделий, работающих в СВЧ диапазоне, существенно отличаются от таковых для низкочастотной техники. Так, для переходов СРГ-50-972В и СРГ-50-974В важно соблюдение плоского торца стекла (на рис.2 поверхности изолятора, контактирующие с упором и опорой), а поверхность изолятора не должна отстоять от торца втулки более чем на 0,1 мм. Таким образом, существенно возрастает роль ориентации и закрепления деталей в приспособлении перед спаиванием.

Рассмотрим процесс получения вакуумно-плотного металлостеклянного соединения в условиях ИРЗ. Перед тем, как поступить на сборку детали переходов проходят многоуровневую очистку [4]. Спаивание осуществляется в камерной электропечи с защитной атмосферой Nabertherm L-9-11-SKM в азоте газообразном особой чистоты 2-й сорт по ГОСТ 9293-74. Перед спаиванием втулка, вывод и стеклянный изолятор собираются в специальном приспособлении (см.рис.2), которое обеспечивает регламентируемое конструкторской документацией расположение деталей. Отметим, что части приспособления, контактирующие со стеклом (поз.2 и 4 на рис.2), изготавливаются из специального мелкозернистого графита, полученного методом изостатического прессования. Два приспособления в специальном контейнере помещают в нагретую до рабочей температуры камеру печи. После выдержки в печи контейнер с узлами устанавливают в приспособление для охлаждения, куда по внешнему контуру подается азот. Осуществляется выдержка в течение 35 минут, затем контейнер перемещают в следующий охлаждающий контур и это повторяется еще дважды. Переходы охлаждаются до комнатной температуры ($\approx 22^\circ\text{C}$). Это позволяет снизить внутренние напряжения в спае и, следовательно, повышает надежность перехода.

Элементами режима спаивания являются температура T и время выдержки t . Также в нашем случае к элементам режима следует отнести массу груза m (поз.5 на рис.2), так как создаваемое графитовым упором давление (поз.4 на рис.2) оказывает непосредственное влияние на растекание стекла. Границы, в которых возможно варьировать время и температуру, определяются физической природой адгезии стекла к металлу. Спай образуется в диапазоне размягчения стекла от 10^6 Пуаз до 10^4 Пуаз. Для С52-1 это соответствует интервалу температур $T \in [825; 1130]^\circ\text{C}$, а минимально необходимое время для образования спая составляет 10 минут.

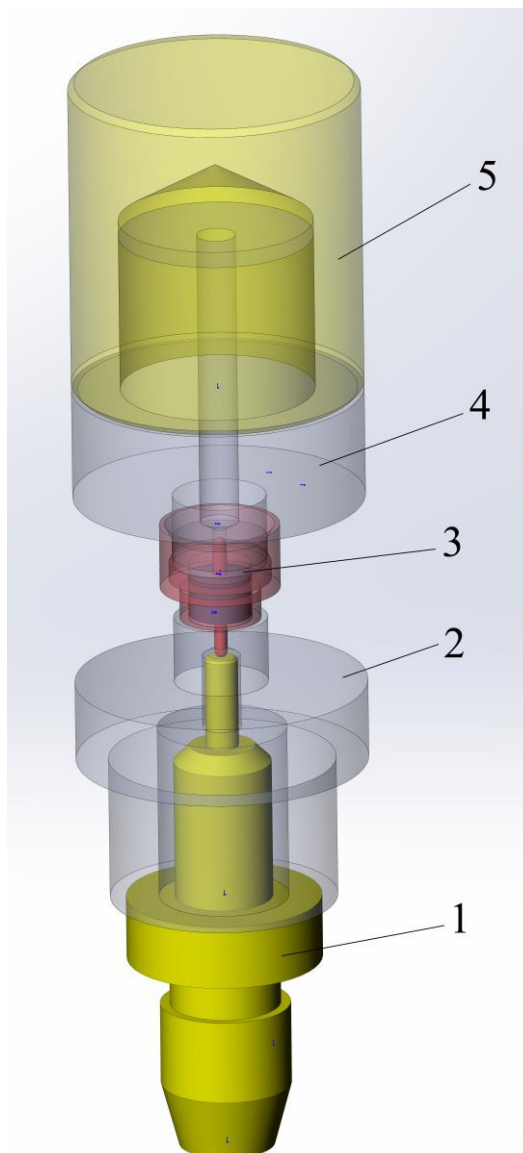


Рис.2. Параметрическая модель гнезда приспособления для спаивания перехода СРГ-50-972В: 1 – подставка; 2 – опора; 3 – переход; 4 – упор; 5 – груз

Для количественной оценки влияния элемента режима спаивания на качество соединения производился расчет доли брака:

$$\text{Доля брака} = (B_b / V) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где B_b - количество забракованных по данному дефекту вилок, V - объем операционной партии вилок.

На основании проведенных на ИПЗ опытных работ установлены следующие интервалы варьирования элементов режима спаивания:

1. Температура $T \in [840; 870]$ °C;
2. Время выдержки $t \in [25; 45]$ мин;
3. Груз $m \in [0; 4,25]$ г.

Поясним выбор этих значений. При спаивании переходов в интервале температур $T \in [825; 840]$ °C до 80% узлов характеризуются плохим растеканием стекла, а часть из них не отвечает требованию к герметичности. Это объясняется худшей адгезией стекла к металлу и его большей вязкостью. При повышении температуры до $T \in (870; 1130]$ °C значительно возрастает

количество наплывов стекла на втулку и токовывод, а также газовых пузырей в спае и изоляторе. Кроме того, повышение температуры ведет интенсификации износа графитовой оснастки. Использование груза массой более 4,5 г ведет к росту доли брака по напыльмам до 100%. Минимальное время выдержки в камере печи 25 мин связано с тем, что после загрузки новой партии деталей печь достигает рабочей температуры через 7-10 минут, после чего узлы необходимо выдержать еще не менее 10 минут.

Обратимся к рис.3: при отсутствии груза напыльмы на втулку и вывод перехода не образуются, однако значительно (до 43,75%) возрастает брак по некачественному растеканию стекла. При установке груза массой 1,25 г доля брака по напыльмам возрастает до 18,75%, а по растеканию падает до 31,25%. Дальнейшее увеличение массы груза до 2,25 г ведет к росту доли напыльмов до 25% и снижению брака по растеканию до 18,75%. Оптимальными по критерию минимизации совокупного брака являются два варианта: работа без груза и использование груза величиной 2,25 г. (по 43,75% брака). Изложенное позволяет сделать вывод о том, что температура 860°C не является оптимальной, т.к. ввиду снижения вязкости стекла использование груза ведет к значительному росту напыльмов, а его отсутствие негативно сказывается на браке по растеканию стекла.

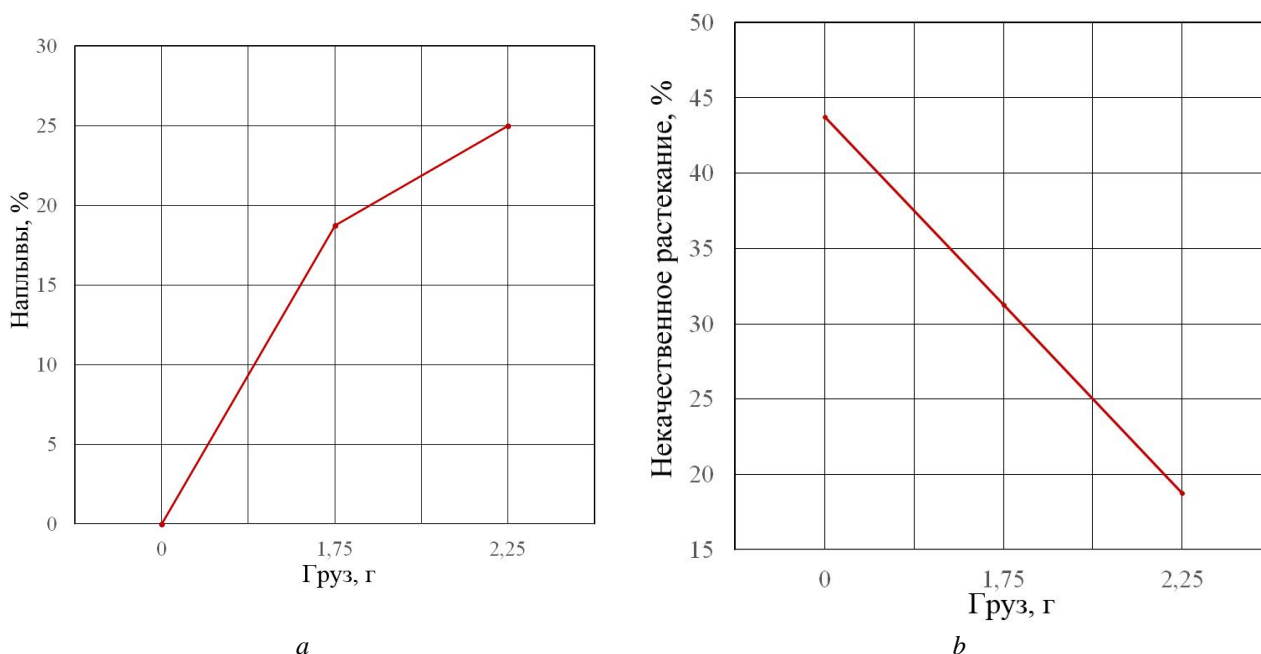


Рис.3. Влияние массы груза на брак по напыльмам (a) и некачественному растеканию стекла (b) при температуре спаивания $T = 860^{\circ}\text{C}$ и времени выдержки $t = 45$ мин

На рис.4 проиллюстрировано влияние груза на долю брака по напыльмам и некачественному растеканию стекла при температуре $T = 855^{\circ}\text{C}$. Режим спаивания без груза был исключен из сравнения, т.к. снижение температуры ведет к росту вязкости стекла, что вкпе с отсутствием груза негативно сказывается на величине брака по некачественному растеканию стекла (до 90% узлов). Видно, что изменение массы груза от 1,75 г до 2,25 г ведет к незначительному увеличению напыльмов от 0% до 3,125%. При этом доля брака по некачественному растеканию снижается от 25% до 16,4%. Таким образом, можно сказать, что снижение температуры до $T = 855^{\circ}\text{C}$ при использовании грузов позволяет значительно снизить долю брака в операционной партии. Оптимальным по критерию снижения брака следует признать режим $T = 855^{\circ}\text{C}$; $t = 45$ мин; $m = 2,25$ г (доля брака 19,525%).

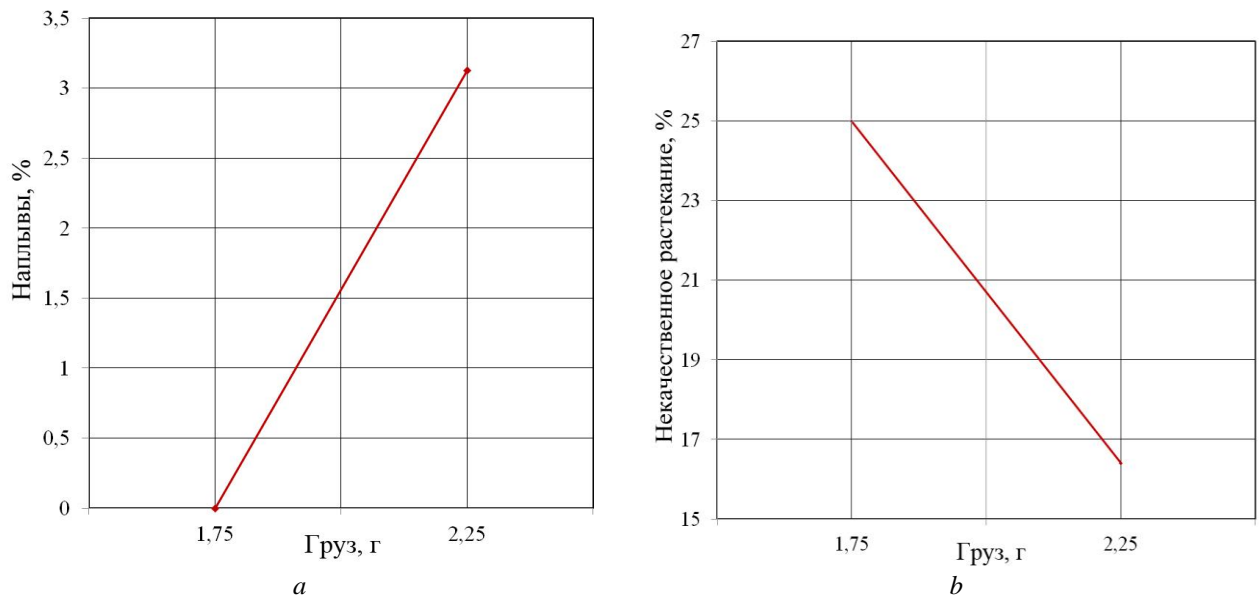


Рис.4. Влияние массы груза на брак по наплывам (a) и некачественному растеканию стекла (b) при температуре спаивания $T = 855^{\circ}\text{C}$ и времени выдержки $t = 45$ мин

Рассмотрим, как отразится изменение температуры на качестве спаянных узлов при установке груза $m = 2,25$ г, показавшего лучшие результаты в предыдущем эксперименте (рис.5). Из рисунка 5 видно, что повышение температуры от 850°C до 855°C практически не влияет на долю наплывов, однако позволяет минимизировать брак по растеканию до $16,4\%$. Дальнейшее увеличение температуры не ведет к снижению доли брака по растеканию, однако крайне негативно влияет на число наплывов (рост до 25%). Таким образом, можно сделать вывод о том, что при работе с грузом в $2,25$ г оптимальная величина температуры – $T = 855^{\circ}\text{C}$.

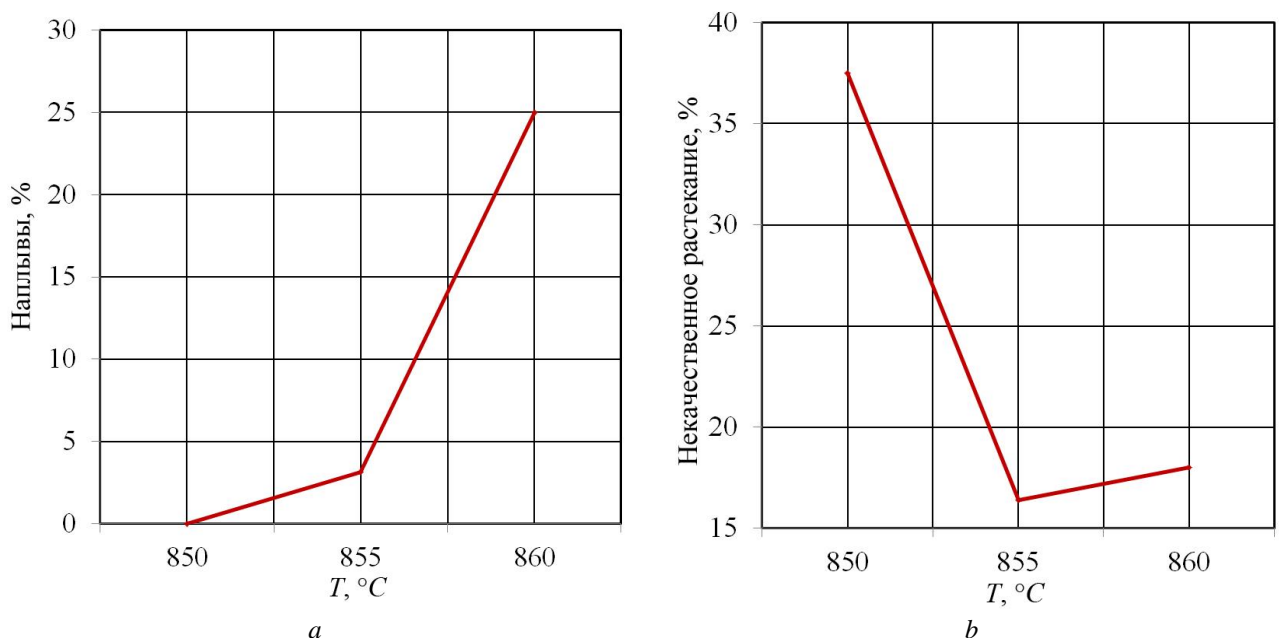


Рис.5. Влияние температуры в камере печи на брак по наплывам (a) и некачественному растеканию стекла (b) при времени выдержки $t = 45$ мин с грузом $m = 2,25$ г

В таблице 2 представлено влияние исследованных параметров режима спаивания на количество брака. Следует уточнить, что влияние температуры и груза затруднительно рассматривать отдельно друг от друга, так как с ростом температуры снижается вязкость стекла

и действие груза становится более эффективным. Ввиду этого за параметр, оказывающий основное влияние, принята температура.

Таблица 2

Влияние элементов режима спаивания на качество металлостеклянного соединения

Вид брака	Параметр	
	$T, ^\circ C$	груз, г
Наплывы стекла на вывод и корпус перехода	+*	+
Некачественное растекание стекла	-*	-

Примечание. Обозначения «+» и «-» показывают, что увеличение или уменьшение этих параметров вызывает повышение доли данного вида брака по (4); «*» - параметр оказывает основное влияние на данный вид брака; «0» - параметр не влияет на данный вид брака.

Стоит заметить, что с износом графитовой оснастки влияние температуры и груза на число наплывов существенно возрастает. Таким образом, необходимо корректировать режим спаивания по мере износа оснастки, либо же снижать ее нормативный период стойкости.

По итогам работы получен оптимальный диапазон варьирования элементов режима спаивания при изготовлении металлостеклянных соединений в герметичных переходах типа SMP:

1. Температура $T \in [850; 855]$ °C;
2. Время выдержки $t \in [40; 45]$ мин;
3. Груз $Q_0 \in [2,1 - 2,3]$ г.

Список литературы

1. Джурицкий К.Б. Основы технологии производства радиоэлектронных средств: курс лекций / К.Б. Джурицкий; «Московский гос. ун-т информационных технологий, радиотехники и электроники»- МИРЭА. Филиал в г. Фрязино. – Фрязино, 2016. – 280 с.
2. Джурицкий К.Б. Современные радиочастотные компоненты и помехоподавляющие фильтры / К.Б. Джурицкий; под ред. А.А. Борисова. – СПб.: ЗАО «Медиа Группа Файнстрит», 2014. - 428 с.
3. Кондакова Л.В. Стеклометаллические корпуса для полупроводниковых и электровакуумных приборов / Л.В. Кондакова, В.А. Михайлова; под общ. ред. М.Л. Любимова. – М.: Энергия, 1979. – 96 с.
4. ОСТ 107.460092.002-86 Соединения металлостеклянные вакуумно-плотные. Типовые технологические процессы.