

СОЕДИНЕНИЯ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА С МЕТАЛЛАМИ  
ДЛЯ РАБОТЫ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ\*

Эффективность применения в летательных аппаратах стеклообразных и керамических материалов во многом определяется надежностью и эксплуатационными характеристиками соединений стекла и керамики с металлами. Одним из наиболее перспективных материалов для применения в иллюминаторах различных приборов является кварцевое стекло. Оно не меняет своих оптических свойств, выдерживает резкие термические перепады.

Крайне низкий коэффициент термического расширения (КТР) кварцевого стекла определяет трудности получения прочных, термостойких соединений этого диэлектрика с металлами. Невозможно подобрать металл или сплав, удовлетворительно согласованный с кварцем в температурном диапазоне сварки (пайки). Поэтому до настоящего времени распространена пайка кварцевого стекла с металлами через серию переходных стекол, обеспечивающих постепенное изменение КТР в зоне соединения. Такая технология исключительно трудоемка и не позволяет в полной мере использовать ценные свойства кварцевого стекла.

Цель настоящей работы — получить переходные соединения «кварц — нержавеющей сталь» для трубчатых конструкций диаметром 70 мм и более. Такие соединения должны обладать достаточной прочностью и сохранять вакуумную плотность при перепадах температур  $\pm 150^\circ\text{C}$  и при работе в специальных средах.

Предварительный анализ опубликованных данных [1, 2] показал, что исследования целесообразно вести в двух направлениях — по пайке пластичным припоем соединений охватывающего типа и сварке торцовых компенсированных соединений через достаточно тонкую металлическую манжету.

Все эксперименты проводились на установке для сварки в вакууме УДС-2. Образцы (детали) нагревались до необходимой температуры индуктором высокочастотного генератора через графитовый экран.

В экспериментах по пайке использовались активные припои олово — титан с содержанием титана в припое в пределах 1,5 — 2,0%. Такие припои характеризуются высокой пластичностью, их релаксационная податливость должна приводить к снижению уровня возникающих «коэффициентных» напряжений до безопасного уровня. Подбор технологических режимов и механические испытания на срез проводились на модельных образцах: кварцевые цилиндры диаметром 12 мм помещали во втулки из нержавеющей

\* Экспериментальные исследования проводились при участии Р. И. Смеляковой, В. И. Любимова.

шей стали с толщиной стенки 0,3—0,4 мм. Исходный зазор при пайке варьировался в пределах 0,1—0,4 мм.

Наилучшие результаты получены на режиме:  $T_{св} = 850 - 900^\circ$ ,  $\tau_{св} = 5 - 10$  мин, зазор 0,15—0,2 мм на сторону. В этом случае прочность соединений при испытаниях на срез достигала  $3,0 \text{ кг/мм}^2$ , вакуумная плотность сохранялась после 10 термоциклов, выполняемых погружением образцов в жидкий азот.

Натурные узлы диаметром 75 мм, имеющие аналогичную конструкцию соединения (рис. 1, а) и запаянные по приведенному режиму, не выдержали испытаний на термостойкость. Вероятно, это обусловлено тем, что при увеличении габаритов паяемого узла в стекле резко возрастают остаточные напряжения сжатия и изгиба. Если бы предел текучести припоя все время оставался ниже значения прочности стекла на изгиб (или растяжение), то при термоциклировании не происходило бы растрескивание стекла в зоне пайки. Но уже в процессе охлаждения соединения от температур пайки сжатие металлической обоймы приводит к упрочнению (наклону) припоя и снижению его релаксационной податливости. Увеличение толщины прослойки припоя до 1,0 мм варьированием исходного зазора не дало положительного эффекта. Металлографические исследования показали, что микротвердость припоя у границы со стеклом увеличивается почти в два раза (с 8,1 до  $1,6 \text{ кг/мм}^2$ ).

Попытка снизить остаточные напряжения путем поперечных разрезов стальной обоймы (заполняемых при пайке расплавляющимся припоем) не дала положительных результатов. Следует полагать, что в этом случае происходит разгрузка от окружающих напряжений, но сохраняются наиболее опасные изгибные напряжения, связанные с изменением абсолютных размеров стальной обоймы и кварцевого цилиндра при термических перепадах. Наличие технологического бурта, необходимого для фиксации положения кварцевой детали, еще более увеличивает жесткость напряженного состояния в контактной зоне.

Соединения торцевого типа (рис. 1 в), в которых торец паяемого кварцевого цилиндра погружается в ванну расплавленного припоя, также не дали требуемого эффекта. Вероятно, в этом случае необходимо применять еще более пластичные припой (на

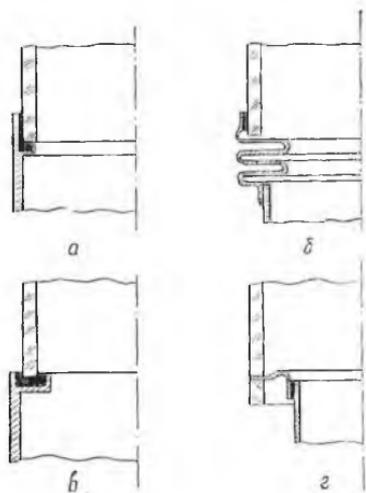


Рис. 1. Стеклометаллические соединения:

а, в — неработоспособные; б, г — работоспособные при низких температурах

основе нидия и т. п.) для того, чтобы процесс охлаждения происходил с разгрузкой от напряжений заземленного конца кварцевой оболочки.

Необходимый эффект достигнут введением промежуточного сильфонного компенсатора (рис. 1, б).

Такой компенсатор разгружает стык от изгибных напряжений и снижает уровень сжимающих (растягивающих) напряжений, так как толщина нержавеющей стали в зоне соединения минимальна (0,12—0,15 мм).

Проведенные испытания показали, что стеклометаллические узлы с сильфонным компенсатором полностью удовлетворяют всем предъявляемым требованиям.

Разработанная конструкция технологична, так как в ней могут быть использованы стандартные сильфоны. В соединении достаточно иметь 2—3 зига; следовательно, сильфон можно разрезать на отдельные элементы с последующей их отбортовкой для стыковки с кварцевым цилиндром и металлической деталью. Герметичное соединение металл — металл может быть выполнено импульсной аргоно-дуговой или роликовой сваркой на серийном оборудовании.

Вариант сварки в твердом состоянии подобных конструкций привлекателен тем, что в этом случае отсутствие легкоплавкого припоя позволяет значительно повысить верхний температурный предел эксплуатации изделия [2].

Высокая термомеханическая надежность соединения достигается при его конструктивном оформлении, показанном на рис. 1, г. Манжета из меди толщиной 0,2—0,3 мм приваривается к торцовым поверхностям кварцевой детали и компенсатора. В таком компенсированном стыке отсутствуют изгибные напряжения, а пластическая деформация тонкой манжеты из пластичного металла приводит к значительной релаксации возникающих при температурных перепадах коэффициентных напряжений.

Минимальная высота кварцевого компенсатора [3] рассчитывается из соотношения

$$b = 0,45 \sqrt{\delta_c R},$$

где  $\delta_c$  — 5,0 мм толщина стенки кварцевого цилиндра;

$R$  — радиус цилиндра.

Для получения качественных соединений хрупких материалов методом сварки в твердом состоянии необходимо обеспечить равномерное сжатие деталей по всему периметру цилиндрических деталей. Это достигается предварительной притиркой торцовых поверхностей кварцевых детали и компенсатора и применением специального приспособления для передачи усилия сжатия при сварке.

Медные манжеты, имеющие компенсационный выгиб, изготавливали штамповкой полиуретаном. Перед сваркой они отжигались и подвергались специальной термической обработке для по-

лучения тонкой поверхностной окисной пленки. Сварка выполнялась на режиме:  $T=850^{\circ}\text{C}$ ;  $P=0,7 \text{ кг/мм}^2$ ;  $t=20 \text{ мин}$ ;  $V=10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$  В процессе сварки в вакууме может выполняться и пайка медной манжеты с корпусом из нержавеющей стали. В этом случае между ними помещается фольга припоя ПСр72.

Узлы, выполненные сваркой в твердом состоянии, выдерживают термоциклы с опусканием в жидкий азот без потери вакуумной плотности. Механическая прочность соединения при испытаниях на растяжение приближается к прочности кварцевого стекла.

В последние годы в области сварки без расплавления ведутся поиски путей интенсификации этого процесса (наложением поля ультразвуковых колебаний, циклическим изменением температуры, давления и т. д.). Имеются сведения о положительном эффекте наложения тока высокого напряжения непосредственно при сварке диэлектриков с металлами. Предполагается, что градиент напряжения постоянного тока ускоряет диффузию ионов в зоне соединения, что облегчает развитие всех стадий процесса [4, 5].

Нами были проведены такие исследования применительно к сочетанию кварцевое стекло — металл. Положительный потенциал высоковольтного источника постоянного тока присоединялся к металлической манжете, отрицательный — к кварцевому образцу. Прикладываемое напряжение могло изменяться в диапазоне 300—3000 в. Тщательная изоляция исключала короткое замыкание и пробой диэлектрика во время опыта.

Эксперименты показали, что приложение напряжения 1000—1500 в позволяет снизить температуру сварки на  $150\text{—}250^{\circ}\text{C}$  при неизменных остальных параметрах процесса. При металлографических исследованиях обнаружена миграция меди в контактирующую поверхность кварцевого стекла. По-видимому, в случае сварки в твердом состоянии кварцевого стекла с металлами механизм образования соединения существенно отличен от механизма, обсуждаемого в работах [4, 5] для сходных условий соединения силикатных стекол с металлами. В этих работах ведущая роль отводится ионам натрия, входящего в состав силикатных стекол. Миграция их интенсифицирует диффузионный массобмен в контакте «стекло—металл» и облегчает формирование соединения. Кварцевое стекло является практически чистой двуокисью кремния и характеризуется высокой прочностью направленных связей его структурной сетки. Поэтому даже в поле высокого напряжения разрыв связей и миграция ионов кремния маловероятны. Следовательно, в поле высокого напряжения может интенсифицироваться диффузия ионов со стороны металла (меди), что и приводит к созданию переходного слоя, обнаруживаемого металлографически.

Аналогичные исследования были проведены для пар: кварцевое стекло — алюминий, кварцевое стекло — никель. Но для этих сочетаний указанный эффект проявился в меньшей степени.

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны два варианта конструкции и технологии изготовления переходных соединений «нержавеющая сталь—кварцевое стекло», работающих при криогенных температурах.

2. Проведены эксперименты и показан положительный эффект от наложения при сварке в твердой фазе кварца с медью поли высокого напряжения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Любимов М. Л. Спай стекла с металлом. М., Госэнергиздат, 1957.
2. Копылов Ю. П. Получение соединений кварца с металлом. Ж. «Обмен опытом в электронной промышленности» М., 1968, № 1, стр. 46—56.
3. Метелкин И. И., Поздеева И. П. Влияние пластичности конструкционного металла и релаксации напряжений в припои на величину механических напряжений в торцовых спаих керамики с металлами. Труды конференции по электронной технике. М., 1966, № 1, стр. 17—40.
4. I. Appl. Phys<sup>11</sup> 1969 Vol 40, No 13. 5396—5397.
5. Kramer Irvin B. Burrows Charles Diffnsien. bonding [Mortin Marietta Corp]. Пат. США кл. 290 484, № 3 256 598, заявл. 25.07.63.

Ф. И. Кигаев, Ю. Г. Лекарев, А. Г. Цидулко, Л. А. Наумов,  
А. В. Шавкунов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ УПЛОТНЯЮЩИХ СЛОЕВ $\text{BN} + \text{C} + \text{Ni}$

Металлокерамические материалы, применяемые для уплотнений в рабочем тракте авиадвигателей, должны обладать достаточными прочностными свойствами, высокой эрозионной стойкостью жаро- и термостойкостью при температурах работы изделия. Кроме того, уплотняющий материал должен иметь хорошую прирабатываемость, низкий коэффициент трения и не должен наволакиваться на поверхности контактирующих с ним деталей. Столь разнообразные и порой противоречащие друг другу требования поставили задачу исследования технологии плазменного напыления многокомпонентных смесей применительно к уплотнениям компрессора.

В настоящей работе представлены результаты исследования свойств напыленного слоя  $\text{BN} + \text{C} + \text{Ni}$  в зависимости от параметров режима напыления.

Для исследований была выбрана композиция  $\text{BN} + \text{C} + \text{Ni}$  с весовым содержанием углерода — 8,9%, нитрида бора — 18,8%, кремния — 21%, остальное — никель. Исходная шихта пред-