

УДК 621.3.084.2:608.4

ВАКУУМ-ПЛОТНАЯ ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ТЕРМОПАР ПОЛИМЕРНЫМИ ЗАЛИВОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

И. В. Никитушкин, Н. В. Тимощенко

На сегодняшний день отсутствует техническое решение герметичного ввода термопар в вакуумную камеру без разрыва термоэлектродного провода, необходимого для проведения вакуумно-тепловых испытаний приборов. В статье представлены основные конструктивные решения и технологические приемы, реализованные при разработке и изготовлении вакуумного герметичного проходного ввода термопар на базе стандартного соединителя РС50.

Ключевые слова: вакуумный гермоввод, термовакуумные испытания, полимерные материалы, эпоксидные компаунды, силосановые герметики, термопары.

В ходе вакуумно-тепловых испытаний радиоэлектронной аппаратуры космической техники существует необходимость непрерывного контроля температуры в характеристических точках конструкции и на корпусах электрорадиоизделий. Количество точек контроля может достигать 150. Экономически и технически целесообразным является применение малогабаритных термоэлектрических преобразователей (термопар). В технике успешно применяются различные конструкции термопар для измерения температуры разнообразных объектов и сред. Широкий диапазон измерения температур (от -250 до $+2500$ °С), высокая точность ($0,01$ °С), безынерционность, ремонтпригодность и простота конструкции делают их востребованными.

Независимо от конструкции термопар существует проблема их герметичного ввода в вакуумную камеру. Вакуумные стеклянные гермовводы для этой цели неприменимы из-за недопустимости разрыва термоэлектродного провода. Поэтому для измерения температур в вакуумной камере применяются следующие способы:

– пропускание отдельных проводников термопар, очищенных от оболочки и изоляции, через резиновые манжеты фланцевого уплотнения камеры. Такой способ оправдан при относительно малом количестве термопар, но неприемлем при значительном количестве контролируемых точек;

– размещение внутри вакуумной камеры специальных устройств – преобразователей термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), передающих измерительный сигнал стандартными гермовводами или по радиоканалу из камеры наружу. Однако размещение в камере постороннего устройства имеет ряд недостатков: требуется вакуумное исполнение электроники устройства, обеспечение его устойчивости к колебаниям температуры и давления, иногда к газоразрядной плазме, сокращается полезный объем камеры, необходима термостаби-

лизация термопар, внутренний объем камеры загрязняется газовыделениями и паразитным электромагнитным излучением.

Вакуум-плотный герметичный ввод термопар в вакуумную камеру позволит обойти указанные недостатки.

Исходя из вышесказанного, сформулированы основные конструктивно-технологические требования к гермовводу:

– заделка и герметизация термопар полимерными материалами – компаундами и герметиками;

– вакуумная плотность, механическая и диэлектрическая прочность заделки термопар;

– простота конструкции, без применения нестандартных деталей;

– высокая степень унификации, обеспечивающая использование различных типов термопар;

– дешевизна изготовления, хорошая копируемость.

Для реализации поставленных задач необходимо:

– разработать формулировку концепции создания вакуумного гермоввода термопар;

– провести анализ проблемы вакуум-плотной герметизации полимерными материалами с учетом их газопроницаемости, в том числе на границах раздела разнородных материалов;

– выбрать герметизирующие полимерные материалы и способы подготовки термопар в зависимости от типа изоляции;

– разработать конструкцию гермоввода на основе стандартного соединителя с использованием его составных частей;

– отработать технологию герметизации, макетирование гермоввода, проверить вакуум-плотность, изготовить рабочие образцы.

Концептуально гермоввод термопар должен представлять собой пучок n -го количества термопар длиной 4 – 5 м, в средней части которых находится вакуумный уплотняющий элемент. Уплотняющий элемент должен иметь присоединитель-

ные размеры, соответствующие размерам конструктива из набора стандартных посадочных окон на фланце вакуумной камеры (рис. 1).

Как наиболее распространенное выбрано посадочное окно диаметром 27 – 28 мм, предназначенное для герметичного соединителя типа РСГ50 в соответствии с АВ0.364.047 ТУ. Однако использовать соединитель РСГ50 в качестве базового конструктива невозможно по причине его монолитной конструкции. Поэтому был выбран негерметичный соединитель типа РС50.

В АО «НПЦ «Полус» широко применяются полимерные материалы, представленные в основном эпоксидными компаундами и силиконовыми герметиками как собственной разработки, так и промышленно выпускаемые.

В технике высокого вакуума полимерные отверждаемые компаунды и герметики применяются как вспомогательный элемент в системах уплотнений для изоляции находящейся под давлением жидкой среды. Для уплотнения газообразных сред полимеры используются ограниченно или не используются вовсе ввиду сравнительно большой газопроницаемости [1 – 3].

Как правило, для обеспечения герметичности применяются кристаллические материалы – неорганические стекла, ситаллы, алюмооксидная керамика. Среди полимеров в качестве уплотнений используются полиэтилен, политетрафторэтилен, капрон, вулканизированные каучуки (резины) [4].

Резины – это каучуки, прошедшие процесс вулканизации, в нормальном состоянии нетермопластичны и не могут быть переработаны методом литья. Литье каучуков в необходимую форму возможно, но при сверхвысоких давлениях и температурах с последующей вулканизацией, что с учетом концепции разрабатываемого гермоввода осуществить не представляется возможным.

Силиконовые отверждаемые герметики обладают прекрасными литьевыми свойствами, имеют достаточно плотную упаковку макромолекул, но слабо развитые поперечные связи, из-за чего характеризуются большей газопроницаемостью, обусловленной высокой скоростью диффузии молекул газа по сравнению с вулканизированными каучуками [1, 3, 5]. Вместе с тем герметики обладают крайне низкой механической прочностью, избирательными адгезионными свойствами к другим материалам, при деформации склонны к отслаиванию. При герметизации герметиками высока вероятность появления утечки вдоль границы раздела материалов между герметиком и корпусом гермоввода или телом термоэлектродного провода. Поэтому герметики могут применяться только как вспомогательный уплотняющий элемент.

В отличие от силиконовых герметиков эпоксидные компаунды имеют высокую механическую прочность, хорошую адгезию к большинству металлических и неметаллических материалов и малую газопроницаемость. Однако в силу резко нерегулярной упаковки макромолекул ненаполненные эпоксидные материалы склонны к образованию микродефектов структуры с высокой скоростью диффузии молекул газа.

С учетом того, что механизмы газопроницаемости полимерных материалов [5] различные, предложен концепт-эскиз гермоввода на базе соединителя РС50 (рис. 1).

Для изготовления гермоввода выбраны термопары, выполненные из проволок сплавов никель-хром и никель-алюминий (диаметром 0,03 ... 0,2 мм) следующих марок:

– термопары хромель-алюмелевые (ТХА) (К) (ГОСТ 6616-94);

– провод хромель-алюмель термоэлектродный с фторопластовой экструдированной изоляцией и оболочкой (ПТФФ ХА) (ТУ 3567-002-97927353-2010).

Термопары имеют электрическую изоляцию каждой жилы и общую оболочку. Изоляция термопары ТХА выполнена из стекловолокна, термопары ПТФФ ХА – из фторопласта.

Для герметизации термопар необходимо обеспечить контакт заливочного компаунда непосредственно с поверхностью каждой проволоки.

Стекловолоконистая изоляция термопары ТХА не препятствует прохождению компаунда, в этом случае достаточно пропитать термопары в зоне герметизации низковязким эпоксидным компаундом.

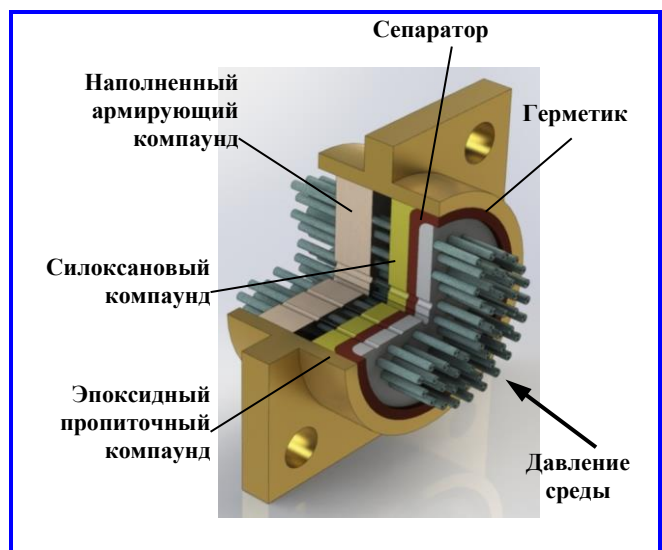


Рис. 1. Концепт-эскиз гермоввода термопар на базе соединителя РС50

Сплошная изоляция из фторопласта термопары ПТФФ ХА должна быть удалена на длине участка герметизации. Пропитка в низковязком компаунде в этом случае не требуется, но при заливке необходимо обеспечить электроизоляционные зазоры между оголенными проволоками термопар, используя сепараторы из диэлектрического материала.

Для обеспечения герметичности полимерными материалами проведен выбор герметизирующих материалов из числа разработанных и применяемых в АО «НПЦ «Полус»:

- низковязкий электроизоляционный пропиточный компаунд горячего отверждения на основе эпоксидной модифицированной смолы, отверждаемый изометилтетрагидрофталевым ангидридом в присутствии ускорителя УП-606/2.

Компаунд обладает хорошей проникающей и цементирующей способностью, разработан для качественной пропитки и заполнения капиллярного пространства между проводом термопары и изоляцией (стекловолокно или фторопласт);

- эластичный компаунд-герметик холодного отверждения на основе эпоксидированного каучука ПДИ-3 АК, модифицирующих добавок и отвердителя аминного типа. Компаунд разработан для герметизации разъемов и бескорпусных элементов с целью влагозащиты;

- эластифицированный эпоксидный облегченный заливочный компаунд марки ЭДЛ-20М (ОСТ 92-1006-2013), разработанный для заливки штепсельных разъемов и гермовыводов;

- однокомпонентный герметик на основе низкомолекулярного кремнийорганического каучука ВГО-1 (ТУ 38.303-04-04-90).

Вилка и розетка негерметичного соединителя РС50 выполнены в алюминиевом оксидированном корпусе, представляют собой завальцованную с одной стороны конструкцию. В результате разборки вилки и розетки использованы некоторые их составные части, а именно:

- кожух и корпус вилки целиком. Корпус имеет блочную конструкцию с присоединительным фланцем. С корпуса срезана завальцованная часть хвостовика и проточена посадочная поверхность. Внутренний объем корпуса и кожуха зачищены до металлического блеска;

- кабельный кожух розетки, у которого оставлена цилиндрическая часть с резьбой, а муфта срезана;
- резиновая уплотнительная прокладка вилки (рис. 2, а);

- решетка из пресс-материала (рис. 2, б), которая удерживает плавающие контакты розетки от выпадения;

- направляющая втулка контактов розетки (сепаратор) (рис. 2, в).

В зависимости от типа изоляции термопарных проводов была разработана технология герметизации.

При изготовлении гермоввода с термопарами со стекловолоконистой изоляцией ТХА были применены составные части соединителя РС50: корпус вилки, кабельный кожух, резиновая уплотнительная прокладка, решетка и сепаратор из пресс-материала.

Для предотвращения протекания пропиточного компаунда применялся кремнийорганический герметик ВГО-1 и резиновая уплотнительная прокладка (рис. 2, а).

В результате пропитки происходит достаточно большое натекание компаунда по капиллярам термопар и стекловолокну в хвостовики термопар, в процессе сушки оно увеличивается в 1,5 раза. Для снижения эффекта натекания компаунда применены технологические приемы:

- варьирования режимов сушки компаунда;
- барьерная пропитка эластичным кремнийорганическим компаундом.

Внутренний объем соединителя послойно заливается разнородными компаундами с последующим отверждением каждого слоя. Толщина каждого слоя не более 5 мм, общая высота заливки 25 – 30 мм.

При изготовлении гермоввода с термопарами ПТФФ ХА необходимо удаление сплошной фторопластовой изоляции на длине участка герметизации.

Изоляция удалялась механической зачисткой: в слое изоляции делался разрыв после неглубокого надреза острозаточенным слесарным инструментом, длина разрыва увеличивалась до 5 – 7 мм сдвижением изоляции в стороны (рис. 3).

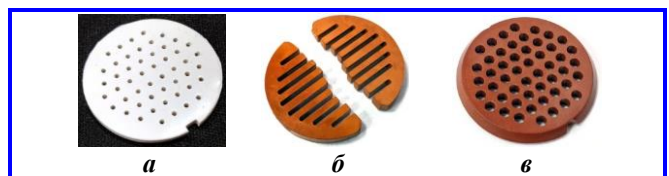


Рис. 2. Выбранные составные части соединителя РС50: а – резиновая уплотнительная прокладка вилки; б – решетка из пресс-материала; в – сепаратор



Рис. 3. Удаление изоляции термопары ПТФФ ХА на длине участка герметизации

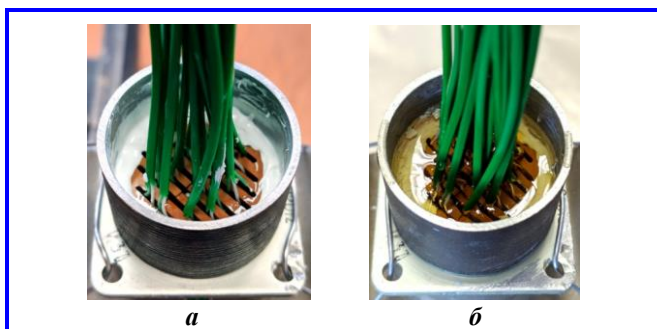


Рис. 4. Гермоввод до (а) и после (б) заливки первого слоя компаунда с применением вакуума

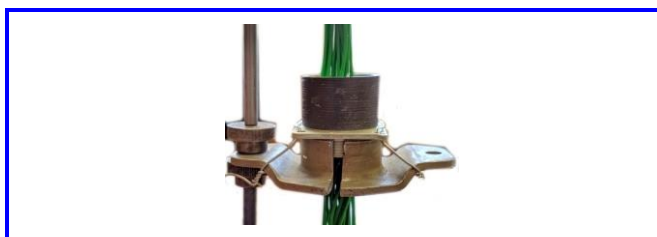


Рис. 5. Подставка для заливки гермоввода



Рис. 6. Рабочий образец гермоввода с термопарами ТХА (а) и ПТФФ ХА (б)

Для изоляции оголенных проволок друг от друга использовались три комплекта решеток (рис. 2, б), собранных прорезями перпендикулярно друг к другу таким образом, чтобы каждая проволока оказалась заключена в индивидуальный канал. Это позволило создать электроизоляционный зазор вокруг каждой проволоки и сохранить доступ для протекания заливочного компаунда, но ограничило максимальное количество термопар до 24 штук.

Первый слой заливается пропиточным компаундом с применением вакуума (рис. 4).

Заливка в обоих вариантах производится на подставке, обеспечивающей фиксацию и правильное расположение термопар (рис. 5).

Термопары со стекловолнистой изоляцией ТХА перед пропиткой необходимо сформовать с учетом особенностей эксплуатации (например, изогнуть вакуумную часть под определенным углом).

Термопары со сплошной изоляцией из фторопласта ПТФФ ХА предварительно формовать не требуется, так как в процессе заливки они не подвержены натеканию и поэтому не теряют стойкости к многократным перегибам при эксплуатации.

Степень герметичности макетов гермовводов измерялась гелиевым течеискателем Inficon UL 1000 Fab.

Подставка представляет собой стальной полый цилиндр, на одном торце которого имеется штуцер, а на другом – посадочное гнездо с резиновым уплотнителем, имитирующее фланцевую часть вакуумной камеры.

В настоящее время изготовлены и находятся в эксплуатации три гермоввода с термопарами ТХА и один с термопарами ПТФФ ХА (рис. 6). Гермовводы применяются для вакуумно-тепловых испытаний приборов, разрабатываемых АО «НПЦ «Полус».

Степень герметичности макетов с термопарами ТХА и ПТФФ ХА не превышает $1 \cdot 10^{-8}$ Па·м³/с при уровне собственной герметичности откачной системы течеискателя и присоединительных шлангов $1 \cdot 10^{-9} \dots 1 \cdot 10^{-8}$ Па·м³/с.

Как показал опыт проведения термовакуумных испытаний приборов при давлении $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., гермовводы не оказывают существенного влияния на натекание вакуумной камеры.

Литература

1. Тагер А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер. – Москва : Химия, 1970. – 490 с.
2. Роговин З. А. Успехи химии и технологии полимеров / З. А. Роговин. – Москва : Химия, 1970. – 189 с.
3. Шетц М. Силиконовый каучук / М. Шетц ; пер. с чеш. под ред. О. Н. Долгова [и др.]; под ред. д-ра хим. наук А. Л. Клебанского и канд. хим. наук О. Н. Долгова. – Ленинград : Химия. Ленингр. отд-е, 1975. – 145 с.
4. Балицкий А. В. Технология изготовления вакуумной аппаратуры / А. В. Балицкий. – 2-е изд., перераб. – Москва ; Ленинград : Энергия, 1966. – 312 с.
5. Рейтлингер С. А. Проницаемость полимерных материалов / С. А. Рейтлингер. – Москва : Химия, 1974. – 272 с.

Поступила в редакцию 14.09.2020

*Игорь Валерьевич Никитушкин, начальник лаборатории.
Надежда Викторовна Тимощенко, инженер-технолог 1 категории.
Т. 8 (382) 260-66-09, e-mail: info@polus-tomsk.ru.
(АО «НПЦ «Полус»).*

VACUUM TIGHT SEALING OF THERMOCOUPLES WITH POLYMER CASTING MATERIALS

I. V. Nikitushkin, N. V. Timoshchenko

Today, there is no ready-made technical solution for hermetically input thermocouples into the vacuum chamber without breaking thermoelectrode wires for the needs of devices vacuum-thermal tests. Basic design solutions and technological tricks implemented during development and manufacture of vacuum-grade thermocouples pass-through input based on standard PC50 connector are presented in this paper.

Key words: vacuum-grade input, vacuum-thermal tests, polymeric materials, epoxy compound, silicone potting compound, thermocouples.

References

1. Physical chemistry of polymers / A. A. Tager. – Moscow : Khimiya (Chemistry), 1970. – 490 p.
2. The progress of polymer chemistry and technology / Z. A. Rogovin. – Moscow : Khimiya (Chemistry), 1970. – 189 p.
3. Silicon rubber / M. Schetz ; translated from Czech under the editorship of O. N. Dolgov [et al.]; edited by A. L. Klebanskii, Doctor of Chemistry (D.Sc.) and O. N. Dolgov, Candidate of Chemistry (Ph. D.). – Leningrad : Khimiya (Chemistry). Leningrad branch, 1975. – 145 p.
4. Vacuum equipment manufacturing technology / A. V. Balitskii. – 2nd edition, revised. – Moscow ; Leningrad : Energia, 1966. – 312 p.
5. Permeability of polymer materials / S. A. Reitlinger. – Moscow : Khimiya (Chemistry), 1974. – 272 p.

*Igor Valerevich Nikitushkin, Head of Laboratory.
Nadezhda Viktorovna Timoshchenko, 1st Category Process Engineer,
tel.: +7 (382) 260-66-09, e-mail: info@polus-tomsk.ru.
(JSC «Research and Production Center» «Polus»).*