

УДК 666.11

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ТОКОВВОДОВ СЛЮДОСИТАЛЛОМ

Кузьмин А.А., Яблокова М.А.

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
Санкт-Петербург, e-mail: marina.yablokova@gmail.com*

Любой токоввод содержит токопроводящие стержни, электроизоляторы и детали, обеспечивающие прочность и герметичность конструкции. Изоляторы чаще всего изготавливают из пластмасс, керамики или стекла, однако пластмассы обладают ограниченной газонепроницаемостью, прочностью и теплостойкостью. Керамика газопроницаема, нетехнологична и плохо обрабатывается. При спаивании стекла с металлом возникает целый ряд технологических проблем. В настоящей работе предлагается в качестве изолятора использовать механически обрабатываемый слюдоситалл, который обеспечивает эксплуатационные свойства на уровне стекла и фарфора, но значительно технологичнее их в обработке. Прочность и жесткость предложенных конструкций достигается применением посадки с натягом. Герметичность более дешевых и массовых конструкций обеспечивается пропиткой наружных и сопряженных поверхностей полимерными композициями. Для более жестких условий эксплуатации была отработана технология спаивания. Поскольку в реальном токовводе и ситалл и стекло могут испытывать только напряжения сжатия или сдвига, достигнутая при растяжении прочность свидетельствует о высокой работоспособности всей конструкции. В результате выполненных работ была разработана технология сборки токоввода с изолятором из ситалла. Предложены и практически реализованы две технологии герметизации: пропитка полимерной композицией и герметизация стеклом специально подобранного состава.

Ключевые слова: токоввод, слюдоситалл, прочность, герметичность, изолятор

SEALING OF CURRENT LEADS WITH MICA-GLASS CERAMIC MATERIAL

Kuzmin A.A., Yablokova M.A.

*St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), St. Petersburg,
e-mail: marina.yablokova@gmail.com*

Any current lead contains the conductive terminals, insulators, and parts for strength and tightness. Isolators are often made of plastics, ceramics or glass, but plastics have limited gas tightness, strength and resistance to heat. Ceramics is gas-permeable, low-tech and poorly handled. When soldering the glass-to-metal there are a number of technological problems. In the present work a mechanically handled mica-glass ceramic material is offered as an insulator, which provides operational properties at the level of glass and porcelain, but much smarter in treatment. The strength and rigidity of the proposed structures is achieved by using an interference fit. The tightness of the cheaper and mass structures is ensured by impregnation of the exterior and mating surfaces with polymer compositions. For more tough operating conditions the technology of soldering was worked out. Since both the sital and the glass can only experience compression or shear stresses in a real current drive, the tensile strength is indicative of the high performance of the entire structure. As a result of the work the technology was developed for assembly of a current lead with an insulator made of glass-ceramic. Two sealing technologies were proposed and implemented: impregnation of the polymer composition and the sealing with glass of specially selected composition.

Keywords: current lead, mica-glass ceramic, strength, tightness, insulator

Эксплуатация морских судов, глубоководных аппаратов, энергетических установок и химических агрегатов невозможна без применения токовводов. Главными критериями работоспособности токовводов являются: прочность, герметичность, термостойкость, химическая (коррозионная) стойкость и способность надежно обеспечить передачу требуемой электроэнергии. Принципиальные схемы токовводов имеют вид, представленный на рис. 1.

Одножильные токовводы используются для передачи больших мощностей, многожильные используются как элементы органов управления. Помимо требований, перечисленных выше, токовводы должны быть устойчивы к короткому замыканию, не вносить искажений в электрические сигналы, обладать высокой электропроводностью [1], устойчивостью к повышенным

температурам [2]. Поскольку основными диэлектриками являются пластмассы, стекла и керамика, то слабым звеном в конструкции токоввода является изолятор, так как и прочность, и термостойкость, и газонепроницаемость этих материалов значительно ниже, чем у металлов [3].

Самыми технологичными из перечисленных материалов являются пластмассы, которые являются достаточно хорошими диэлектриками, однако их проницаемость значительно выше, чем у стекол и металлов, они склонны к старению и растрескиванию [4]. Очевидна недостаточная по сравнению с металлами, стеклами и керамикой прочность и устойчивость пластмасс к повышенным температурам. Новые технологии в некоторых случаях позволяют заменить силикатные изоляторы пластмассовыми, однако при жестких режимах экс-

плутации изоляторы из стекла, фарфора и керамики являются более надежными, чем изоляторы из пластмасс.

Поскольку изделия из фарфора и керамики изготавливаются спеканием, они неизбежно содержат поры, что отрицательно сказывается на газопроницаемости. Фарфор и керамика обрабатываются только абразивным инструментом и не поддаются обработке резанием, поэтому выпуск любого нового изделия требует новых форм и оснастки, что особенно невыгодно при выпуске малых партий.

Указанного недостатка лишено стекло, которым можно спаивать втулку со стержнем, заливая его в пространство между ними и тем самым обеспечивать надежное крепление и герметизацию (рис. 1). Это особенно эффективно при изготовлении многожильных тоководов (рис. 1, б). Но технологическим ограничением при организации подобных спаев является [1] условие

$$\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3, \quad (1)$$

где α_1 – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала втулки; α_2 – ТКЛР стекла, α_3 – ТКЛР материала стержня.

Условие (1) обусловлено тем, что при охлаждении спая в стекле могут возникнуть напряжения растяжения, а прочность стекла при растяжении значительно меньше, чем при сжатии. Поэтому при организации стекло-металлических спаев нужно стре-

миться к созданию в стекле напряжений сжатия. Втулки часто изготавливают из нержавеющей стали, ТКЛР которой составляет $18 \cdot 10^{-6}$ 1/град. У стекол ТКЛР ниже, поэтому токопроводящие стержни делают из кобальта [1], у которого α находится в пределах $(5-6) \cdot 10^{-6}$ 1/град. ТКЛР кобальта близок по своему значению ТКЛР припоечных стекол, что удобно для организации спая, но удельное сопротивление кобальта составляет $0,15 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, а меди $0,17 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, т.е. на порядок ниже. Следствием этого различия является то, что в случае перегрузки или короткого замыкания стержень из кобальта перегревается и может расплавить изоляцию проводов или припой в контактах. Медь такого перегрева не вызывает, поэтому закономерно стремление изготавливать втулки из нержавеющей стали, а токопроводящие стержни из меди.

Предлагается в качестве изолятора использовать механически обрабатываемый слюдоситалл на основе калиевого фторфлогопита [5]. Он достаточно прочен, обрабатывается на металлорежущих станках, является хорошим диэлектриком. Литейная технология изготовления обеспечивает лучшую, чем у керамики, вакуумплотность. Силикатный состав гарантирует широкий температурный диапазон эксплуатации. В [6] показано, что варьированием режимов термообработки можно получить материал, обладающий следующими свойствами:

модуль упругости при растяжении, МПа $0,4 \cdot 10^5$;
разрушающее напряжение при сжатии, МПа 320;
разрушающее напряжение при изгибе, МПа 54;
термостойкость на удар, °С 750;
температурный коэффициент линейного расширения, град⁻¹ $80 \cdot 10^{-7}$;
натекание по гелию, л·мм рт. ст. /с, не более 10^{-7} ;
удельное электрическое сопротивление, Ом·м $2 \cdot 10^{13}$.

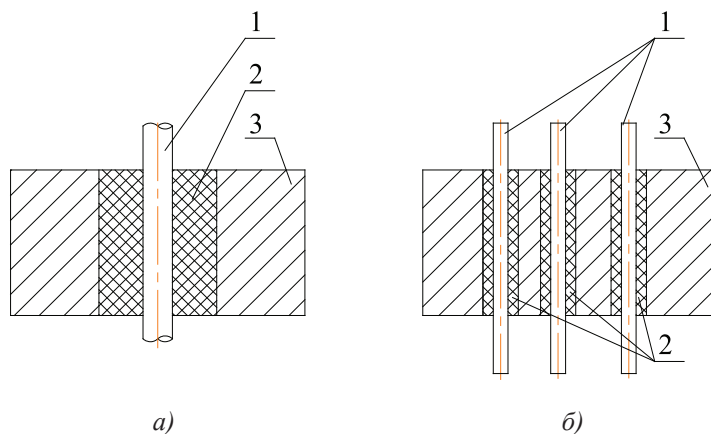


Рис. 1. Схемы тоководов: а) одножильного; б) многожильного: 1 – токопроводящий стержень; 2 – электроизоляция; 3 – втулка

В настоящей работе схема (рис. 1, а) была реализована в конструкции, представленной на рис. 2.

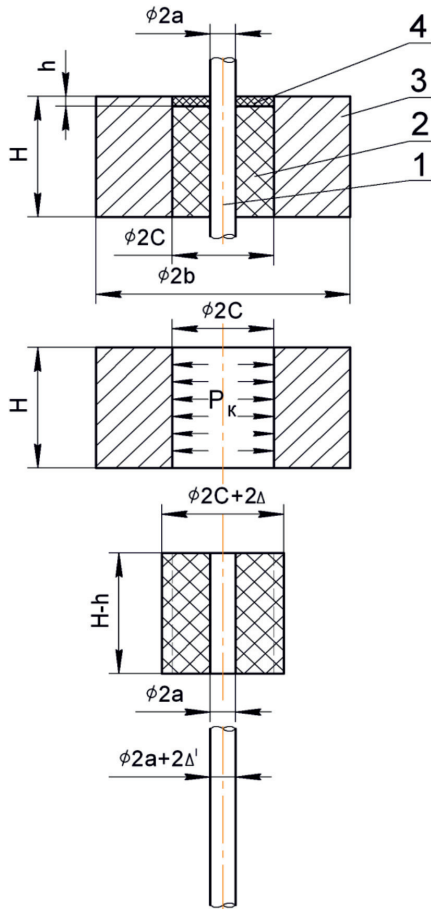


Рис. 2. Токоввод в сборе: 1 – медный стержень, 2 – втулка из слюдоситалла, 3 – втулка из стали, 4 – стеклянная заливка; $2a = 5$ мм, $2b = 35$ мм, $2c = 18$ мм, $H = 20$ мм, $h = 1$ мм, $\Delta = 40$ мкм, $2\Delta^1 = 3,5$ мкм

Сборка всей конструкции выполнялась в следующей последовательности. Втулка 3 нагревалась до 300°C , что обеспечивало тепловое расширение по радиусу c на величину $c \cdot \alpha \cdot \Delta T = 0,049$ мм. Такое тепловое расширение дает возможность обеспечить натяг $\Delta = 0,040$ мм с учетом величины поля допуска $IT = 0,009$ мм для линейных размеров от 10 до 18 мм по 6-му квалитету [7]. Величина $\Delta = 0,040$ мм выбрана с учетом того, что в этом случае контактное давление p_k по радиусу c , рассчитанное по известной формуле (2) [8], составляет

$$p_k = \frac{\Delta}{\frac{c}{E_2} \left(\frac{1+k_2^2}{1-k_2^2} - \mu_2 \right) + \frac{c}{E_3} \left(\frac{1+k_3^2}{1-k_3^2} + \mu_3 \right)}, \quad (2)$$

где $E_2 = 0,4 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости ситалла;

$E_3 = 2,0 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости стали; $\mu_2 = \mu_3 = 0,3$ – коэффициенты Пуассона ситалла и стали;

$k_2 = d/c = 0,28$; $k_3 = c/b = 0,51$,

около 20 МПа, а эквивалентное напряжение по третьей теории прочности $\sigma_{\text{экв}} = 2p/(1-k_2) = 44$ МПа, что меньше разрушающего напряжения при изгибе. Таким образом, $\Delta = 0,040$ мм – это величина натяга, которая обеспечивает безопасную эксплуатацию втулки из ситалла. Подобный уровень напряжений для стали будет заведомо безопасен. В качестве допускаемого напряжения для ситалла выбрано разрушающее напряжение при изгибе $\sigma_{\text{и}}$, поскольку ситалл заведомо будет испытывать только сжатие, но в случае какой-либо местной неточности при изготовлении имеется определенный запас прочности. Величина натяга Δ должна иметь наибольшее значение, чтобы ситалл постоянно находился в сжатом состоянии. В этом случае его тепловое расширение будет синхронным с тепловым расширением стали, у которой модуль упругости E значительно выше, чем у ситалла. Если сжатый ситалл будет подчиняться законам теплового расширения стали, то автоматически будет выполняться условие (1), что позволяет получить прочный спай. При нагреве на температуру ΔT собранных по посадке с натягом втулок 2 и 3 натяг уменьшится на величину $c \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta T$, где $\Delta \alpha$ – разность ТКЛР стали и ситалла. Определим величину ΔT , при которой натяг пропадет:

$$\Delta T = (\Delta + IT/2) / c \cdot \Delta \alpha = 500^\circ\text{C}. \quad (3)$$

Таким образом, в интервале температур от 0 до 500°C ситалл постоянно находится в сжатом состоянии и его тепловое расширение синхронно с тепловым расширением стали. Это именно тот интервал температур, при котором происходит организация спаев. В охлажденном состоянии втулки из стали и ситалла образуют единое прочное изделие, которое можно использовать и без спаивания.

Следующим этапом сборки токоввода является установка медного стержня. Очевидно, что при установке этого стержня во втулку из ситалла получается заготовка токоввода, герметизацию которой можно производить самыми различными способами и материалами. Величину натяга Δ^1 следует выбирать из условия прочности кольца из ситалла 2 под действием внутреннего давления p_k , возникшего вследствие этого натяга:

$$\sigma_{\text{экв}}^{\text{III}} = 2p_k/(1-k_2) < \sigma_{\text{и}}. \quad (4)$$

Величина p_k , рассчитанная по формуле (4), не должна превышать 16 МПа. В таком случае величина $2\Delta^1$, рассчитанная по

формуле (2), должна составлять 3,5 мкм, что соответствует половине поля допуска 6-го качества в диапазоне линейных размеров от 3 до 6 мм. Нагрев заготовки на 100 °С увеличит внутренний диаметр $2a$ на величину $2a \cdot \alpha_{\text{ст}} \cdot \Delta T = 4$ мкм, что обеспечивает установку медного стержня. Как было отмечено выше, после установки медного стержня получается заготовка токоввода, прочность, термостойкость и изолирующие свойства которого выше, чем у токовводов с пластмассовыми изоляторами. Герметизацию подобной конструкции можно произвести с использованием тех же полимерных материалов. При этом пути повышения эффективности применения подобных материалов постоянно развиваются. Так, авторы [9] для повышения адгезии и газонепроницаемости рекомендуют использовать галогенсодержащие эластомеры. Применение синтетических клеев позволяет компенсировать неточности изготовления сопрягаемых поверхностей [10] и обеспечивать при этом высокую прочность. Для склеивания и защиты металлических деталей, работающих при высоких температурах, хорошие результаты обеспечивают клеи и покрытия на основе фенолформальдегидных смол [11]. То есть, если требования к токовводу не самые высокие, то экономически целесообразно в конструкции, выполненной по схеме, показанной на рис. 2, пропитать ситалл и его сопряженные со сталью и медью поверхности выбранной полимерной композицией. При необходимости можно произвести горячее отверждение. Подобная схема сборки проста и доступна. Если технические требования повышенные, то целесообразно применение стекла.

Следующим этапом настоящей работы была отработка технологии герметизации токоввода стеклом. В качестве исходного было выбрано применявшееся ранее в аналогичных случаях стекло следующего состава (мас. %): SiO_2 – 28,7; B_2O_3 – 14,3; TiO_2 – 14,0; V_2O_5 – 2,0; K_2O – 14,5; Na_2O – 16,5; Li_2O – 2,0; BaO – 1,0; CdO – 4,0; MgO – 2,0; ZnO – 1,0. Для улучшения адгезионных свойств припоечного стекла дополнительно вводили B_2O_3 и CoO в разных весовых содержаниях. Составы исследуемых стекол приведены в табл. 1.

Таблица 1
Составы припоечных стекол

Компонент	№ состава					
	1	2	3	4	5	6
B_2O_3	–	17,0	27,0	–	37,0	37,0
CoO	–	1,0	1,0	2,0	–	2,0

Варка стекол производилась в мазутной печи в кварцевых тиглях при температуре 1200 °С в течение одного часа. После выработки образцы отжигались в течение двух часов при температуре 400 °С. Для всех шести стекол на основе проведенных испытаний были построены дилатометрические кривые, которые приведены на рис. 3.

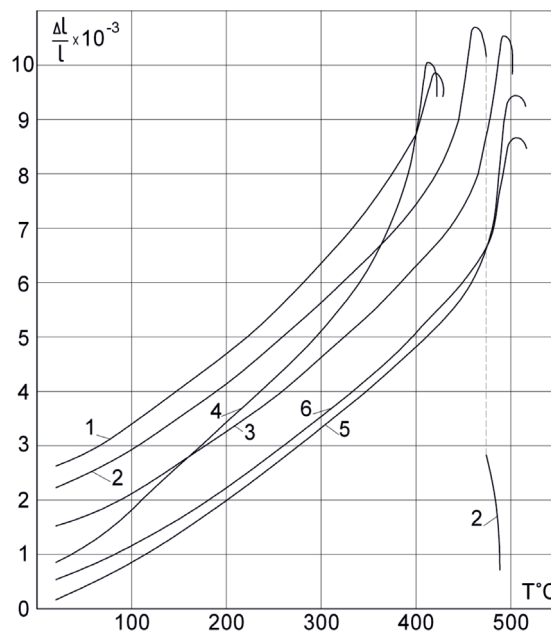


Рис. 3. Дилатометрические кривые. Цифры у кривых соответствуют номеру состава в табл. 1 и 2

Обработкой дилатометрических кривых были определены свойства исследованных стекол, которые приведены в табл. 2, где $\alpha_{100-300}$ – ТКЛР исследованных стекол в интервале температур от 100 до 300 °С, T_g – температура стеклования, $T_{\text{н.д.}}$ – температура начала деформации.

Таблица 2
Свойства исследованных стекол

№ состава	$\alpha_{100-300} \cdot 10^{-7} \text{град}^{-1}$	$T_g, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{н.д.}}, ^\circ\text{C}$
1	162	400	435
2	135	425	465
3	125	445	490
4	161	378	425
5	121	450	493
6	117	450	493

С учетом полученных результатов была отработана технология спаивания элементов токоввода. Поверхности стержня 1, втулок 2 и 3 (рис. 2) очищаются, в свободное

пространство заливается шликер и в печи при температуре 780 °С в течение 25 минут производится выдержка. После двухчасового отжига при температуре 400 °С вся конструкция медленно охлаждается до комнатной температуры. Поскольку стекла значительно хуже сопротивляются растяжению, чем сжатию и сдвигу, для оценки работоспособности изделий, содержащих стекло-металлические спаи, необходимы испытания этих спаев на растяжение. Эксперименты проводились с применением оснастки, представленной на рис. 4.

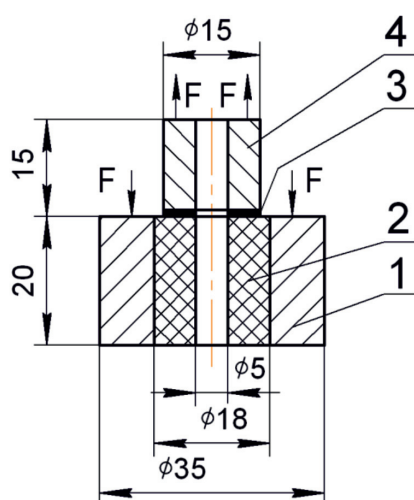


Рис. 4. Модель для испытаний спая на растяжение: 1 – стальная втулка, 2 – втулка из стали, 3 – припоечное стекло, 4 – втулка из стали; F – приложенные к образцу силы

Результаты испытаний на отрыв втулки 4 от втулки 2 показали наибольшую эффективность состава № 3. Прочность спая при этом составила 5,6 МПа. Поскольку в реальном токовводе и ситалл и стекло могут испытывать только напряжения сжатия или сдвига, достигнутая при растяжении прочность свидетельствует о высокой работоспособности всей конструкции. Наилучший результат состава № 3 ($\alpha_{100-300} = 125 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$) можно

объяснить тем, что тепловое расширение сжатого стальной втулкой ситалла является усредненным между тепловым расширением стали и находящегося в недеформированном состоянии ситалла, т.е. фактически имеет место согласованный спай. В результате выполненных работ была разработана технология сборки токоввода с изолятором из ситалла. Предложены и практически реализованы две технологии герметизации: пропитка полимерной композицией и герметизация стеклом специально подобранного состава.

Список литературы

1. Тепляков М.В., Хазиева М.Д. Гермоввод как элемент корабельной электроэнергетической системы // Новый университет. – 2014. – № 11. – С.37–42.
2. Тепляков М.В., Селиванов А.В., Хазиева М.Д. О расчете корабельных токовводов на устойчивость при пожаре // Приволжский научный вестник. – 2014. – № 5. – С.46–57.
3. Лазаревский Н.А., Тепляков М.В. Нормативные требования по величинам протечек для устройств уплотнения и результаты опытов с некоторыми уплотнительными материалами // Судостроение. – 2013. – № 3. – С. 38–39.
4. Тепляков М.В. О применении электроосмоса при изготовлении и ремонте токовводов в судовом электромонтажном производстве // Судостроение. – 2013. – № 6. – С. 80–84.
5. Кузьмин А.А. Влияние фторидов магния и алюминия на механические свойства слюдоситалла // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2016. – № 35(61). – С. 43–46.
6. Кузьмин А.А., Яблокова М.А. Влияние режимов термообработки на свойства механически обрабатываемого слюдоситалла // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 1. – С. 79–85.
7. Скороходов Е.А. Общетеchnический справочник / Е.А. Скороходов, В.П. Законников, А.Б. Пакнис, К.Ф. Скворцов, А.Н. Малов. – 4-е изд. испр. – М.: Машиностроение, 1990. – 496 с.
8. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наукова думка, 1975. – 704 с.
9. Сухарева К.В., Андриясян Ю.О., Михайлов И.А., Попов А.А. Защитные покрытия на основе синтетических каучуков // Пластические массы. – 2015. – № 11–12. – С. 57–62.
10. Кравцова Е.А., Феськов С.А. Области применения клеящих веществ // Пластические массы. – 2016. – № 3–4. – С.51–53.
11. Амирсланова М.Н. Лакокрасочные и клеевые композиции на основе фенольных олигомеров // Пластические массы. – 2014. – № 11–12. – С. 51–53.