

Норильск. В результате возможен существенный экологический эффект за счет снижения потребления неэкологичных дизельного топлива и мазута.

Экологический эффект от использования ПАТЭС может быть достигнут по 3-м направлениям: переход энергоснабжения с природного газа на энергию АЭС (ожидаемое снижение углеродного следа, по оценкам автора, на 23,5 тыс. тонн при 50 % загрузке ПАТЭС), перевод системы теплоснабжения г. Дудинка на тепло ПАТЭС (ожидаемое снижение углеродного следа — 87,9 тыс. тонн) и за счет перевода железнодорожного транспорта с дизельного топлива на СПГ (потенциал снижения углеродного следа — 60 тыс. тонн). Кроме того, на котельных г. Дудинка больше не будет мазута как резервного топлива, что устраняет риск его аварийных утечек.

Основные проблемы при разработке стеклогерметиков для ТОТЭ и ТОЭ

**М. В. Ерпалов^{1,2}, В. А. Никонорова^{1,2},
А. В. Кучугуров^{1,2}, С. Г. Власова², Н. Т. Шардаков²**

¹Институт высокотемпературной электрохимии

Уральского отделения Российской академии наук

²Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, водород рассматривается в качестве перспективного энергоносителя и инструмента для решения задач по развитию низкоуглеродной экономики и снижению антропогенного влияния на климат. К числу основных задач развития водородной энергетики относятся разработка отечественных технологий производства водорода методом электролиза воды, технологий топливных элементов и материалов нового поколения, а также развитие инжиниринга водородных энергоустановок. При этом одним из основных объектов разработки и исследований становятся твердооксидные

топливные элементы (ТОТЭ) и электролизеры (ТОЭ) планарной конструкции.

Основными компонентами стеков ТОТЭ и ТОЭ являются твердый электролит, анод, катод и интерконнекторы. На сегодняшний день в России достигнуты большие успехи в области получения и исследования материалов электролитов и электродов [1; 2]. В России имеется положительный опыт изготовления единичных элементов и стеков ТОТЭ и ТОЭ [3]. Однако сохраняются проблемы с разработкой подходящих герметизирующих материалов, предназначенных для предотвращения выхода топлива из стека и попадания окислителя в топливное пространство. К герметикам для изготовления стеков ТОТЭ и ТОЭ предъявляются высокие требования к механической совместимости с компонентами единичных элементов ТОТЭ и ТОЭ, а также с интерконнекторами, требования к газонепроницаемости, адгезии и электросопротивлению. В процессе эксплуатации герметики подвергаются воздействию высоких температур (600–1000 °С). В дополнение к этому уплотнения постоянно подвергаются воздействию окислительных и восстановительных условий со стороны окислительного и восстановительного газов в катодном и анодном пространствах соответственно.

Для герметизации стеков ТОТЭ и ТОЭ наиболее эффективными материалами являются стекла и стеклокерамика. Герметики на основе стекол могут быть боратными, боросиликатными, алюмосиликатными и силикатными. Они дешевы в изготовлении, демонстрируют приемлемую стабильность в окислительных и восстановительных средах, обладают хорошей адгезией и смачивающими свойствами наряду с высоким электрическим сопротивлением.

Стекла характеризуются температурой стеклования (T_g), выше которой происходит переход из хрупкого состояния в пластичное. При работе при высоких температурах (T_c) стекла могут переходить в стеклокерамическое состояние из-за протекания в них кристаллизации. Обычно кристаллизация увеличивает механическую прочность стекла, но ухудшает пластичность. При достижении температуры размягчения (T_s) стекло склонно к выдавливанию из области соединения. Следовательно, при разработке состава

стекла следует учитывать температуру стеклования, температуру размягчения стекла и температуру кристаллизации стекла.

В жестких клеевых уплотнениях образующийся шов не деформируется при комнатной температуре. Во время тепловых явлений или из-за несоответствия температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) соединение подвержено трещинам и разрушениям. Крайне важно, чтобы герметик имел ТКЛР, соответствующий ТКЛР-компонента, с которым он контактирует. Если они не совпадают, то может произойти искривление ячейки. ТКЛР ферритных сталей находится в диапазоне $(12-13) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, тогда как керамические компоненты имеют ТКЛР, равный $(10-12) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Следует отметить, что свойства стеклогерметиков определяются их химическим составом, условиями нагрева и охлаждения. При этом состав стекол зачастую включает до шести и более различных компонентов, включая стеклообразователи, модификаторы, промежуточные элементы и примеси, каждый из которых существенным образом оказывает влияние на комплекс эксплуатационных характеристик стеклогерметиков. Данное многообразие компонентов и их взаимное влияние делают подбор состава стекла, соответствующего по ТКЛР, температурам стеклования, размягчения и кристаллизации, обладающего высокой адгезией к материалам единичных элементов и интерконнекторов, а также высоким электросопротивлением, крайне трудной задачей.

Список источников

1. *Medvedev D. A., Ricote S.* Electrochemistry of proton-conducting ceramic materials and cells // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2020. № 24 (7). P. 1445–1446.
2. Обратимый твердооксидный топливный элемент для аккумулярования и генерации электроэнергии / Д. А. Осинкин, Н. М. Богданович, Н. М. Береснев и др. // *Электрохимия*. 2018. № 54 (8). С. 740–746.
3. Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки / С. И. Бредихин, А. Э. Голодницкий, О. А. Дрожжин и др. М. : НТФ «Энергопрогресс», Корпорация «ЕЭЭК», 2016. 392 с.