

*Е.В. МОРОЗОВА*, ОАО «Одескабель»

### ТЕМПЕРАТУРОСТОЙКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ГЕРМОЗОНЕ АЭС

Розглянута стійкість кварцових оптичних волокон з особливими фізико-механічними властивостями до дії високих температур. Такі волокна можуть бути використані як сенсори (датчиків), які експлуатуються в агресивних і вибухонебезпечних середовищах разом з волоконно-оптичними кабелями. Оптичне волокно з осердям на основі чистого кварцу і оболонкою, яка легована домішками фтору, більш стійка до дії опромінювання. Захисна оболонка з металу дозволяє розширити температурний діапазон експлуатації оптичних волокон. Залежно від типу металевієї захисної оболонки оптичні волокна можуть працювати при температурах до 700 °С.

Stability of quartz optical fibers with special physic mechanical properties to influence high temperatures is considered. Such fibers are used as the sensor controls (gauges) working in aggressive and explosive environments together with optical fiber cables. The optical fiber with a core from pure quartz and an environment alloyed by an impurity of fluorine is established, that is steadier against influence of an irradiation. The protective environment from metal allows expanding a temperature range of operation of optical fibers. Depending on type of a metal protective environment optical fibers can work at temperatures up to 700 °C.

**Введение.** Кварцевые стекла являются основой для изготовления оптических волокон (ОВ) в системах автоматического контроля и управления различными объектами и процессами АЭС. Оптические волокна в качестве детекторов  $\gamma$ -излучения позволяют регистрировать как дозу облучения, так и местоположение воздействия. Они обладают рядом преимуществ: малым диаметром, отсутствием электромагнитных помех, возможностью измерения от распределенного участка и работы в агрессивных и взрывоопасных средах. При этом оптические волокна могут работать как в качестве датчика, так и в качестве линии связи [1 – 7].

**Требования к защитной оболочке ОВ гермозоны.** ОВ состоят из сердцевинки (1), светоотражающей оболочки (2), первичного полимерного покрытия (3), защищающего ОВ от механических воздействий и влаги, и вторичного защитного покрытия (4) (рис.1). В зависимости от условий эксплуатации защитное покрытие может выполняться свободным, в виде трубки, или плотным. В последнем случае обеспечивается повышенная гибкость волокна, что особенно важно при эксплуатации ОВ в системах контроля гермозоны АЭС. При этом условия эксплуатации ОВ, предназначенных для работы в гермозоне, отличаются от режимов работы ОВ вне гермозоны. Волокна, работающие в гермозоне, должны сохранять работоспособность, как в режиме нормальной эксплуатации, так и в режимах нарушения теплоотвода из герметичной зоны, малой течи, большой течи и запроектной аварии [6]. Для этого ОВ должно иметь герметичную защитную оболочку, которая

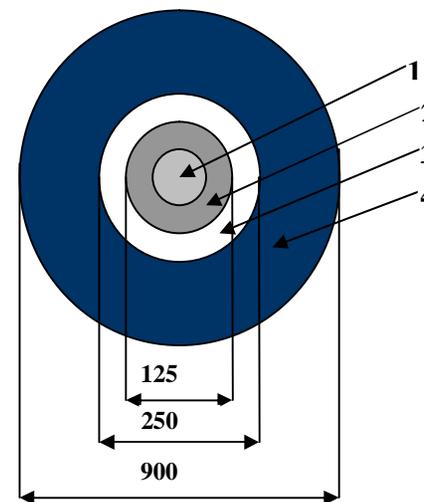


Рис.1 - Конструкция оптического волокна в плотном вторичном защитном покрытии для прокладки внутри помещений

обеспечивает герметичность при многократной обмывке дезактивирующими растворами; выдерживает не менее 120 циклов нагрева и охлаждения за срок службы; устойчива к воздействию высоких температур до + 250 °С в течение, как минимум, 1 часа (в режиме запроектной аварии). Защитная оболочка должна быть радиационно-стойкой и сохранять герметичность и работоспособность ОВ во всем диапазоне сейсмических воздействий для максимального расчетного землетрясения в 8 баллов по шкале МК-64 включительно. При этом собственные частоты колебаний защитной оболочки не должны попадать в запрещенный диапазон частот 23-65 Гц [2].

Таким требованиям удовлетворяют металлизированные ОВ с сердцевинкой из чистого кварца и светоотражающей оболочкой, легированной примесью фтора. В зависимости от диапазона рабочих температур в качестве защитной оболочки волокон могут использоваться, как температуростойкие полимеры, так и металлы (таблица 1).

**Цель статьи** – влияние температуры на термомеханические напряжения в кварцевых оптических волокнах с металлической защитной оболочкой для датчиков гермозоны АЭС.

Таблица 1 - Основные характеристики температуростойких оптических волокон

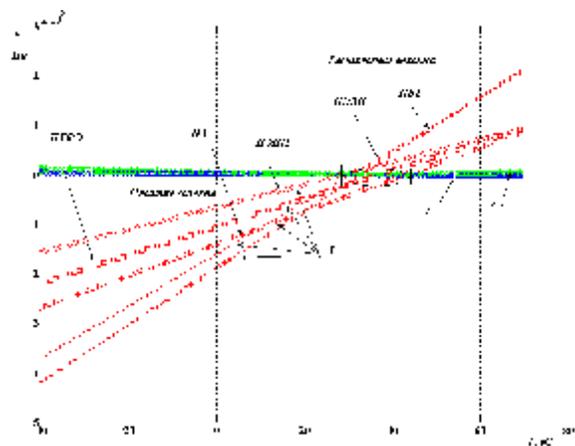
Сердцевина	WF – чистый плавный кварц (низкое содержание гидроксильной группы OH-) UV – чистый плавный кварц (высокое содержание OH- 1200-1700 ppm)
Числовая апертура	NA=0.22 ±0.02
Светоотражающая оболочка	Кварц, легированный примесями фтора
Первичное защитное покрытие	Силиконовое покрытие (диапазон рабочих температур от -40°C до 180°C) Полиамидное покрытие (диапазон рабочих температур от -190°C до 385°C)
Защитная оболочка	1. Нейлон (диапазон рабочих температур от -40°C до 100°C) 2. Тефлон (политетрафторэтилен) (диапазон рабочих температур от -40°C до 150°C) 3. Полиамид П6 – П12 (диапазон рабочих температур -40°C до 100°C) 4. Акрилат (диапазон рабочих температур от -40°C до 85°C) 5. Алюминий (диапазон рабочих температур -70°C до 400°C) 6. Медь (диапазон рабочих температур -70°C до 600°C) 8. Кадмий (диапазон рабочих температур -70°C до 700°C)

**Металлические защитные покрытия.** Кварцевые оптические волокна с герметичным металлическим покрытием обладают всеми преимуществами стандартных оптических волокон. Преимуществом металлических защитных покрытий является повышенная механическая прочность и большое сопротивление "усталости", жаростойкость (таблица 2). Передаточные характеристики соответствуют аналогичным диапазонам стандартных оптических волокон в диапазоне длин волн от 200 до 2400 нм, в зависимости от выбора сердцевинного волокна, работающего в УФ ( $\lambda < 480$  нм) или ИК ( $\lambda > 780$  нм) диапазонах. Отличительной особенностью металлизированных волокон является работоспособность в коррозионных средах, которые реагируют с обычными полимерными покрытиями, а также: широкий температурный диапазон от  $-70$  °C до  $700$  °C; высокая лучевая прочность; улучшенное охлаждение волокна в связи с теплопроводящим металлическим покрытием; высокая механическая прочность и гибкость по сравнению с волокнами с полимерным покрытием; высокая радиационная устойчивость; возможность использования в вакууме и агрессивных средах [3, 4].

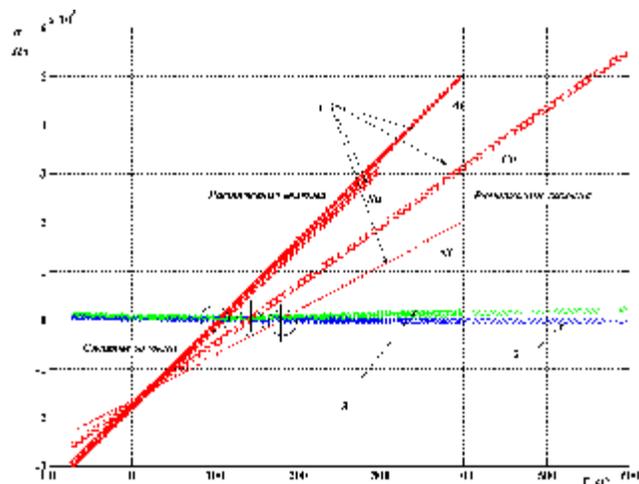
Таблица 2 - Механические и тепловые свойства материалов при нормальных условиях

Материал	Плотность, $\gamma$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, ГПа	ТКЛР, $\alpha$ , $10^{-6}$ 1/°K
Кварцевое стекло	2,2	72,5	0,55
Полибутилентерефталат	1,31	1,6	150
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)	0,92	0,2-0,3	100 - 250
Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП)	0,95	1,0	100 - 250
Поливинилхлоридный пластикат	1,3	0,5	150
Полиамид	1,06	1,7	78
Поликарбонат	1,20	2,3	65
Политетрафторэтилен (фторопласт или тефлон)	2,2	0,8	100
Медь мягкая	8,89	123	17
Медь твердая	8,89	135	17
Алюминий мягкий	2,7	68	23,8
Алюминий твердый	2,7	72	23,8
Олово	7,3	55	23
Никель	8,85	205	13,3
Серебро мягкое	10,5	76	19,7

Помимо преимуществ наблюдается и ряд существенных недостатков металлизированных волокон. Экспериментально показано, что нанесение дополнительной металлической оболочки может приводить к существенному росту потерь излучения. Также в процессе нанесения металлического покрытия возрастает вероятность появления большого числа микроизгибов из-за относительно высокого модуля упругости и достаточной толщины покрытия. Такое покрытие вследствие усадки после нанесения, вызванной разницей в температурных коэффициентах линейного расширения материалов волокна и покрытия или релаксационными процессами, вызывает микроизгибы волокна и, как следствие, избыточные оптические потери. Поэтому процесс изготовления металлизированных волокон очень сложный и требует особого контроля и внимания [5].



а)



б)

Рис.2 - Зависимость термомеханических напряжений в оптическом волокне на основе кварца при разных материалах защитного покрытия: 1 -термомеханические напряжения в самом волокне; 2 – термомеханические напряжения в защитном покрытии; 3 – общее напряжение в конструкции

**Расчет термомеханических напряжений в ОВ с металлическими защитными покрытиями.** Расчет термомеханических напряжений выполнен для двух случаев: 1) при применении в качестве защитных покрытий

традиционных полимерных материалов (рис.2а); 2) при применении металлических покрытий (рис.2б). В обоих случаях в качестве материала первичного полимерного покрытия использовался двухслойный лак: внутренний слой, прилегающий к волокну, взят с малым значением модуля Юнга (упругости)-  $E=10\text{ МПа}$ , а второй – с высоким –  $E=2,5\text{ ГПа}$ . Выполнение первичного покрытия в виде двух концентрических слоев с разными механическими свойствами обеспечивает уменьшение термомеханических напряжений в самом волокне [7].

**Выводы.** Применение металлических защитных покрытий приводит к расширению диапазона работы оптического волокна в зоне термомеханических сжатий. Для волокон с полимерными защитными покрытиями растяжение начинается в диапазоне температур  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ПЭНП)–  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ПА), а при применении металлических –  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для алюминия) –  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для никеля). Прочность кварцевых волокон на сжатие на порядок выше, чем на растяжение. Это значит, что в волокне процесс роста микротрещин Гриффиттса замедлен. В то же время, герметичные металлические покрытия, в отличие от полимерных, являются рентгеноконтрастными, допускают стерилизацию и обеспечивают неизменность оптических и механических характеристик оптического волокна при длительном воздействии неблагоприятных факторов внешней среды: влажности, температуры, радиации. Однако сложность технологии нанесения таких покрытий ограничивает возможность изготовления и применения. Это специальные ОВ, которые могут использовать в гермозонах АЭС.

**Список литературы:** 1. Волков С.В. Распределенные люминесцентные сенсоры гамма-излучения на основе кварцевых стекол / С.В.Волков, Т.П. Янукович; под ред. проф. С.А. Козлова // «Оптика-2003»: труды III –й Международной конференции молодых ученых и специалистов. - СПб: СПбГУ ИТМО. - 2003.- 377 с. 2. Костоков Н.С., Холодный С.Д. Герметичные кабельные вводы для АЭС / Н.С. Костоков, С.Д. Холодный.- М.: Наука. - 2004.- 236 с. 3. Оптические волокна типа кварц/кварц металл [Электронная ресурс]. - Режим доступа: <http://www.optofiber.ru> 4. Оптическое кварцевое волокно со ступенчатым профилем и фторсодержащей оболочкой в металлическом покрытии [Электронная ресурс]. - Режим доступа: <http://www.fiberlab.ru> 5. Шевандин В.С. Кварцевые волоконные световоды с особыми оптическими и механическими свойствами / В.С. Шевандин [Электронная ресурс]. - Режим доступа: <http://www.fiberlab.ru>. 6. Морозова Е.В. Действие облучения на материалы конструктивных элементов волоконно-оптических кабелей / Е.В. Морозова // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. - N34. - С.40 - 48. 7. Беспрозванных А.В. Влияние примесей на радиационно-наведенные потери в оптических волокнах / А.В.Беспрозванных, Б.Г.Набока, Е.В.Морозова // Вестник НТУ «ХПИ».- 2006. -№ 7. - С. 53-58. 7. Беспрозванных А.В. Термомеханические напряжения в оптических волокнах с плотным вторичным покрытием / А.В. Беспрозванных, И.В. Морозов // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. -№ 7. - С. 53-58.

Поступила в редколлегию 03.09.2010