

УДК 621.3.084.2:620.193

Е.Н. Каблов¹, О.В. Старцев¹, И.М. Медведев¹, И.С. Шелемба²**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ
ДЛЯ МОНИТОРИНГА КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В УЗЛАХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ (обзор)**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-26-34

Для мониторинга коррозионных процессов в режиме реального времени в последние годы активно идет разработка специализированных датчиков и приборов – датчиков коррозии. Одним из наиболее перспективных направлений в мониторинге коррозии и коррозионной агрессивности микроклимата является разработка волоконно-оптических датчиков. В данной работе рассмотрены основные направления в разработке волоконно-оптических датчиков коррозии. Показано, что наиболее распространены два типа конструкций: с напылением исследуемого сплава на торцы оптического волокна и на оптическое волокно с брэгговскими решетками, а исследования параметров датчиков выполняются при ускоренных испытаниях.

Ключевые слова: *коррозия, коррозионная агрессивность атмосферы, волоконно-оптические датчики.*

In recent years specialized sensors and devices – corrosion sensors are being developed to monitor corrosion processes in real time. The development of fiber optic sensors is one of the most promising directions in the field of corrosion monitoring and monitoring of microclimate corrosive aggressiveness. The main directions of fiber optic corrosion sensors development are reviewed in this article. It is shown that two types of constructions are the most commonly used, namely: with sputtering of alloy on the ends of optical fiber or optical fiber with Bragg grating, while researches of sensor parameters are performed during accelerated tests.

Keywords: *corrosion, corrosive aggressiveness of atmosphere, fiber optic sensors.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Общество с ограниченной ответственностью «Инверсия-Сенсор» [Limited Liability Company «Inversiya-Sensor»]; e-mail: sales@i-sensor.ru

Введение

Для обеспечения надежной эксплуатации техники в агрессивных климатических условиях важны не только используемые материалы [1–4] и методы защиты [5, 6], но и своевременное техническое обслуживание [7, 8]. Развитие коррозионных повреждений конструктивных элементов, оборудования и оценка коррозионной агрессивности окружающей среды [9–11] позволяют оптимизировать периодичность и режимы технического обслуживания техники, поскольку коррозия при эксплуатации в разных регионах может сильно различаться. Например, на основе исследования коррозии тестовых образцов на самолете РЗ «Орион» обоснован и увеличен до 113 дней интервал между внешними мойками при эксплуатации техники в климате со средней коррозионной агрессивностью. Аналогичные исследования провели для транспортных самолетов С-130 [12].

Для мониторинга коррозионных процессов в режиме реального времени в последние годы активно идет разработка специализированных датчиков и приборов – датчиков коррозии [13–16].

Большинство датчиков коррозии основано на измерении электрических характеристик для оценки интенсивности электрохимических процессов, приводящих к коррозионным поражениям: электросопротивление пластинки или фольги из тестируемого материала [17–21], проводимость между двумя электродами, расположенными в среде (как правило, в строительных конструкциях или жидких средах) [22–24]. Кроме непосредственного мониторинга коррозии [8, 25], сенсоры коррозии дают информацию о параметрах окружающей среды, таких как продолжительность увлажнения [26–30], температура воздуха [26–28, 31], температура поверхности [26], относительная влажность [26–28, 31], концентрация коррозионно-агрессивных примесей в атмосфере [32]. Ведется также создание сенсоров для мониторинга защитных свойств покрытий [33–35].

Некоторые датчики предполагают не только беспроводную передачу данных, но и интеграцию всех чувствительных элементов на борту воздушного судна в единую систему – например, сенсоры компании Luna. Разрабатываются также системы интеграции сенсоров коррозии не только

внутри одной единицы техники, но и внутри подразделений – например, сенсоры компании Varpro.

Одним из наиболее перспективных направлений в непрерывном мониторинге коррозии и коррозионной агрессивности микроклимата является разработка волоконно-оптических датчиков (ВОД). Среди многочисленных преимуществ использования ВОД по сравнению с традиционными электрическими датчиками следует отметить их нечувствительность к внешнему электромагнитному полю, малую массу и габариты, малую потерю сигнала в линиях связи датчика с приемником. Отличительной чертой ВОД является их высокая стойкость к воздействию окружающей среды. Так, по результатам ускоренных испытаний, срок службы подобных датчиков в строительных конструкциях может достигать 60 лет [36].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 18.2. «Развитие методов климатических испытаний и инструментальных методов исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

Волоконно-оптические датчики

Для ВОД чувствительным элементом и линией передачи данных является оптическое волокно. Датчики, основанные на применении оптического волокна, позволяют регистрировать изменения различных величин: температуры [37–39], радиуса кривизны и малых деформаций [40], относительной влажности [41], напряжения переменного и постоянного тока [42], обнаружения химических и биологических компонентов [43–45]. Опволоконные системы также могут использоваться для мониторинга коррозионных процессов [46–52] и параметров окружающей среды, которые могут влиять на безопасность эксплуатации сложных технических систем [53–55].

Волоконно-оптические датчики коррозии подразделяют на две категории:

- основанные на прямых измерениях интенсивности коррозионных процессов, таких как толщина металлического покрытия;
- основанные на косвенных признаках развития коррозии, таких как изменение pH и концентрации ионов металлов.

Существенным недостатком второго типа датчиков является невозможность установления прямой связи между измеряемыми параметрами и интенсивностью коррозионного разрушения.

Основой датчиков коррозии, использующих прямые измерения коррозионного процесса, является слой исследуемого металла [56], в котором фиксируются изменения. Наиболее распространены два подхода:

- качественный, в котором при превышении заданного уровня коррозионной агрессивности окружающей среды происходит срабатывание датчика;

– количественный, в котором используется связь оптических показателей, таких как интенсивность отражения от металлизированной поверхности и скорость протекания коррозионных процессов.

Первый тип датчиков наиболее прост в реализации и дешев в производстве, но не позволяет оценить скорость коррозии. В то же время для принятия решений о техническом обслуживании узла авиационной техники может быть достаточно сведений о достижении коррозионной агрессивности среды заданного уровня.

Волоконно-оптические датчики коррозии, основанные на прямых измерениях состояния металла

Мониторинг коррозии алюминиевых покрытий, нанесенных на поверхность оптического волокна

Компанией Boeing [57–59] разработаны волоконно-оптические датчики коррозии алюминиевых сплавов марок AA2024 (ближайший отечественный аналог – сплав Д16) и AA7075 (ближайший отечественный аналог – сплав В95). Датчики коррозии помещали в элемент конструкции в наиболее коррозионно-опасной зоне, где возможно накопление влаги и развитие локализованной коррозии. Провели ускоренные испытания в камере солевого тумана продолжительностью 7 мес. Один из датчиков был покрыт грунтом для защиты от коррозии. Показано, что для тестирования ВОД коррозии целесообразно использовать чувствительные элементы без защитных покрытий, поскольку при их использовании первые коррозионные процессы могут начаться через годы.

В Центральной школе Лиона (Франция) разработали датчик коррозии [48] с чувствительным элементом из алюминия. Алюминиевое покрытие получали вакуумным напылением, его толщина составляла 2–5 мкм. Установлено качественное соответствие параметров сигнала и площади коррозионных поражений алюминия при погружении в раствор азотной кислоты.

Исследователи из университета Цинхуа (КНР) [60] для оценки чувствительности датчиков с алюминиевым покрытием толщиной 1–1,5 мкм использовали щелочной раствор различной концентрации и испытания в камере солевого тумана. Показано, что при экспозиции в агрессивной атмосфере камеры такая конструкция датчика не обладает достаточной чувствительностью, так как мощность выходного сигнала не меняется при образовании продуктов коррозии.

Мониторинг коррозии покрытий из цветных металлов, нанесенных на поверхность оптического волокна

Специалистами из Центральной школы Лиона (Франция) [47] разработан ВОД, основанный на измерении мощности сигнала, проходящего через

волокно с никелевым покрытием толщиной 6–7 мкм. Показано, что при погружении в ортофосфорную кислоту мощность сигнала меняется в зависимости от продолжительности выдержки и площади коррозионных поражений никелевого покрытия. Однако количественное соответствие между изменением сигнала и степенью коррозионных поражений не выявлено. Впоследствии [46] изготовили датчик коррозии с чувствительным элементом из меди (толщина покрытия 2,75–5,93 мкм). Получили качественное соответствие параметров сигнала и площади коррозионных поражений меди при погружении в раствор азотной кислоты.

Мониторинг коррозии покрытий из сталей, нанесенных на поверхность оптического волокна

Для мониторинга коррозии сталей в университете Цинхуа (КНР) разработан датчик коррозии с покрытием из Fe–C [49]. Схема устройства датчика показана на рис. 1. Проведены исследования зависимости мощности сигнала от концентрации серной кислоты, в которую был погружен датчик и от продолжительности выдержки. Оптические измерения дополнялись электрохимической импедансной спектроскопией, но количественное соответствие между изменением сигнала и степенью коррозионных поражений не выявлено.

В техническом университете Ухань (КНР) [50] датчик коррозии на основе Fe–C конструктивно усовершенствовали: напыление проводили на волокно с брэгговской решеткой [61–64], благодаря чему установлена зависимость смещения спек-

тра под действием коррозионных процессов в покрытии от продолжительности выдержки в растворе NaCl. Толщина покрытия Fe–C составляла 12–15 мкм; авторы констатируют, что достижение необходимой толщины покрытия технологически трудоемко. Показана низкая воспроизводимость результатов: различия в показаниях датчиков, помещенных в одну коррозионно-агрессивную среду, могут достигать 80%.

Один из перспективных способов мониторинга коррозионных процессов Fe–C покрытий заключается в использовании брэгговских решеток для оценки микродеформаций, возникающих при развитии коррозионных поражений [65–67]. При использовании предварительно напряженных образцов или покрытий возможно как создание одноразовых датчиков, показывающих время до разрушения [66], так и датчиков для непрерывного мониторинга коррозионных процессов [65]. Схема устройства такого датчика показана на рис. 2.

Мониторинг коррозии алюминиевых покрытий, нанесенных на торец оптического волокна

Нанесение металлического покрытия на торец оптического волокна позволяет проводить мониторинг скорости коррозии покрытия с использованием простого оборудования, без высоких требований к чувствительности и разрешению прибора, так как интенсивность отраженного излучения существенно меняется от практически полного отражения при высокой целостности покрытия до нулевого отражения при полном разрушении покрытия. Схема устройства такого датчика показана на рис. 3. Мультиплексирование таких датчиков

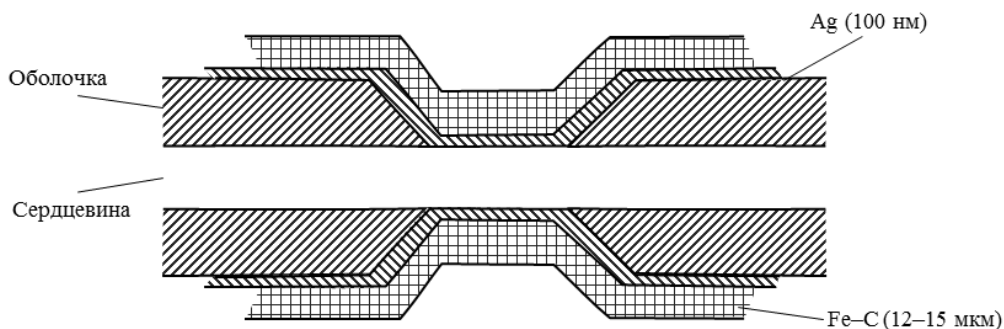


Рис. 1. Датчик коррозии с покрытием Fe–C



Рис. 2. Датчик коррозии на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР)

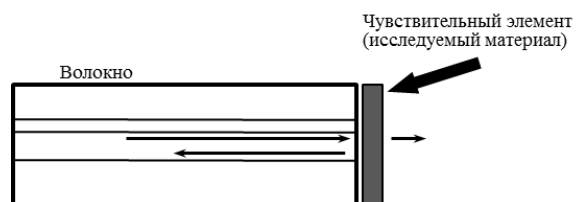


Рис. 3. Датчик коррозии на основе отражения от торца оптического волокна

может быть осуществлено с использованием оптических ответвителей, а опрос серии датчиков выполняется оптическим временным рефлектометром. Для таких датчиков также не требуется температурная компенсация.

В Федеральном университете Пернамбуку (Бразилия) [68, 69] разработан датчик коррозии, для опроса которого использован оптический временной рефлектометр [70]. К основному волокну крепились оптические ответвители, на торце волокон которых методом термического напыления нанесено алюминиевое покрытие толщиной 100 нм. Проведены ускоренные испытания в растворе состава (мас. ч) $25 \text{ H}_2\text{PO}_4 : 1 \text{ HNO}_3 : 5 \text{ CH}_3\text{COOH}$. Интенсивность отраженного света изменяется незначительно в первые 100 с погружения, затем следует резкое падение интенсивности отраженного сигнала, связанное с разрушением покрытия. Несмотря на высокую скорость разрушения покрытия, измеренное значение скорости коррозии алюминия отличалось от расчетного не более чем на 5%.

Более детальная верификация показаний датчиков такого типа проведена в Исфahanском технологическом университете (Иран) [71]. Для лабораторных испытаний использовался раствор азотной кислоты с различными концентрациями: от 25 до 65%. Несмотря на то что результаты прямых измерений скорости коррозии на порядок отличались от показаний датчиков, показана линейная зависимость между скоростью коррозии, измеренной гравиметрически и с использованием датчиков коррозии (коэффициент детерминации составил 0,97). Дополнительно проведены испытания датчика коррозии в морской воде Персидского залива, показана чувствительность датчика к коррозионным процессам в морской воде, но верификацию прямыми измерениями не проводили.

Параметры металлических покрытий и способы нанесения металлов на оптическое волокно

С использованием электрохимических исследований показано [72], что поляризационное сопротивление алюминиевого покрытия оптического волокна, полученного ионным распылением, сопоставимо с поляризационным сопротивлением исходного алюминия (имеется линейная зависимость с коэффициентом детерминации 0,99).

В работе [73] показано, что толщина алюминиевого покрытия на оптическом волокне существенно влияет на чувствительность датчика коррозии – использованы две толщины покрытия: 0,8 и 6 мкм; показаны качественные различия, но не даны количественные оценки. Испытания в растворе азотной кислоты показали более высокую чувствительность датчиков с алюминиевым покрытием толщиной 2 мкм по сравнению с покрытием толщиной 5 мкм [48].

С использованием компьютерного моделирования показано [59], что при увеличении толщи-

ны алюминиевого покрытия >5 мкм мощность выходного сигнала не будет изменяться в зависимости от толщины покрытия, следовательно, использование покрытий >5 мкм нецелесообразно ввиду потери чувствительности датчика.

Для изготовления датчиков коррозии сталей используется нанесение металлических пленок Fe–C, по химическому составу приближенных к исследуемой стали. Для нанесения Fe–C покрытия в работах [50, 67, 74] использована гальванизация; для обеспечения проводимости предварительно наносили серебряное покрытие толщиной ~ 100 нм.

Косвенные измерения коррозионных процессов

При мониторинге коррозии в соединениях разнородных материалов (металлов и неметаллов) традиционные схемы ВОД коррозии не применимы. Возможным решением является использование косвенных индикаторов протекания коррозионных процессов, таких как появление ионов металлов в окружающей среде и изменение pH [75–78]. В Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН для мониторинга коррозионных процессов с использованием ИК спектроскопии широко применяется волоконная оптика [79–82].

Датчики ионов алюминия

В Институте военно-прикладных исследований Австралии опробованы различные полимеры для внедрения в них чувствительного к ионам алюминия вещества – 8-оксихинолина [83]. Оптимальным полимером оказался полиэтиленгликоль, который эффективно поглощал влагу из окружающей среды и обеспечивал транспорт ионов алюминия к чувствительному элементу датчика. В Высшем техническом институте Лиссабона (Португалия) использован аналогичный подход для мониторинга коррозии алюминидовых сплавов в соединениях авиационной техники [84]. Показана высокая чувствительность датчика на основе 8-оксихинолина к концентрации ионов алюминия и малая чувствительность к другим ионам, таким как Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} и Cu^{2+} . Датчики размещались в соединениях из алюминиевого сплава авиационного назначения марки AA2024-T3, которые испытывали в камере солевого тумана. Показана принципиальная возможность использования датчиков для мониторинга коррозии алюминидовых сплавов в соединениях, но количественная оценка не проводилась.

Волоконно-оптические датчики коррозионной агрессивности окружающей среды

Волоконно-оптические датчики могут быть применены не только для непосредственного мониторинга коррозии металлов и сплавов, но и для измерения параметров коррозионной агрессивности

окружающей среды, таких как относительная влажность [85, 86], концентрация хлоридов, газов [87–92] и наличие микроорганизмов [93–95].

Датчики относительной влажности

Для измерений относительной влажности воздуха разработано большое количество ВОД относительной влажности, в которых используются различные чувствительные элементы: силикагель [96], кремнезем [97], хитозан [98], композит на основе оксида графита и поливинилового спирта [99], ацетобуритат целлюлозы [100], оксид олова [101], оксид индия, легированный никелем [102], оксид кремния [103].

Волоконно-оптические датчики относительной влажности обеспечивают чрезвычайно высокое разрешение (до 0,06% [100]) и широкий диапазон измеряемых значений – от 4 до 100% [96]. Волоконно-оптические датчики на основе брэгговских решеток могут быть использованы для

одновременного мониторинга деформаций и относительной влажности [104].

Датчики концентрации хлоридов

Концентрация хлоридов является одним из основных факторов коррозионной агрессивности среды [105–109]. Большинство ВОД концентрации хлоридов основаны на измерении показателя преломления света в растворе [110–114]. Датчики могут быть использованы не только для мониторинга концентрации хлоридов в природных средах, но и в бетонных конструкциях [115, 116], так как хлориды являются одной из основных причин коррозии арматуры. Волоконно-оптические датчики хлоридов позволяют определять концентрации NaCl от 0,5 до 3,5 г/л [117] с высокой точностью (до 300 ppm) [118].

В таблице показаны наиболее распространенные конструктивные схемы и материалы, используемые в ВОД коррозии, основанных на прямых измерениях.

Наиболее распространенные конструктивные схемы и материалы, используемые в волоконно-оптических датчиках коррозии

Конструктивное решение	Мультиплексирование	Регистрируемый параметр	Первичный преобразователь	Литературный источник	
Металлическое покрытие на торце оптического волокна	С использованием ответвителей	Интенсивность отраженного сигнала	Al (100 нм)	[68, 69, 71]	
			Al (500 и 750 нм)	[119]	
Металлическое покрытие на сердцевине оптического волокна	Отсутствует	Сила света при различных углах падения (имеет вид гауссова распределения). Оценивается ширина гауссова пика на половине его высоты (полуширина)	Ni-P (6–7 мкм)	[47]	
			Cu (~4,5 мкм)	[46]	
			Al (2 и 5 мкм)	[48]	
			Мощность выходного сигнала	Ag (300 нм)+ +Fe-C (1 мкм)	[49]
				Al (1,3 и 2 мкм)	[60]
				Al (1–2 мкм)	[73]
				AA2024 (2 мкм)	[57]
AA2024 (2–3 мкм)	[59]				
Нанесение металлического покрытия на волокно с брэгговской решеткой	С использованием оптического разветвителя (1×2)	Спектральные характеристики сигнала, отраженного от брэгговской решетки	Au (100 нм)+ +Fe-C (12–15 мкм)	[50]	
Нанесение акрилатных, полиимидных и алюминиевых покрытий на оптическое волокно	Отсутствует	Время до разрушения	Акрилатные, полиимидные, алюминиевые покрытия толщиной от 7 до 60 мкм	[66]	

Выводы

Большинство исследований чувствительности ВОД коррозии к коррозионным процессам проводились в течение непродолжительного времени в чрезвычайно коррозионно-агрессивных условиях: растворах кислот, щелочей и NaCl. Несмотря на большое количество исследований, посвященных разработке ВОД, оценка применимости датчиков к мониторингу атмосферной коррозии не изучена в полной мере. Во многих исследованиях приняты попытки количественно установить

соответствие между изменением отклика ВОД и развитием коррозионных поражений.

С учетом зарубежного опыта для создания экспериментальных ВОД коррозии алюминиевых сплавов целесообразно апробировать два типа конструкций: с напылением исследуемого сплава на торцы оптического волокна и на оптическое волокно с брэгговскими решетками. После проведения испытаний экспериментальных датчиков коррозии при натурной экспозиции и ускоренными методами необходимо оптимизировать конструкцию датчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. P. 7–17.
2. Каблов Е.Н., Каримова С.А., Семенова Л.В. Коррозионная активность углепластиков и защита металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком // *Коррозия: материалы, защита*. 2011. №12. P. 1–7.
3. Кулюшина Н.В., Козлов И.А., Кутырев А.Е., Вагрямян Т.А. Адгезионные покрытия на основе триалкоксисиланов для алюминия и стали // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №8. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.12.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-5-5.
4. Захарова Л.В. Анодно-оксидное покрытие – защита титановых сплавов от горячесолевого коррозии // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №10. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.12.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-2-2.
5. Карлов В.А., Ковальчук Ю.Л., Кузнецов Ю.И. и др. Защита от морской коррозии сталей в замкнутых объемах // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. №5. С. 35–40.
6. Ивонин В.Н., Чинь К.К., Динь В.Д. и др. Об эффективности противокоррозионной защиты алюминиевых сплавов конверсионными покрытиями в условиях влажного тропического климата // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. №10. С. 44–48.
7. Rinaldi G., Huber T., McIntosh H. et al. Corrosion sensor development for condition-based maintenance of aircraft // *International Journal of Aerospace Engineering*. 2012. Vol. 2012. P. 1–11.
8. Harrigan S. A condition-based maintenance solution for army helicopters // *The AMMTIAC Quarterly*. 2009. Vol. 4. No. 2. P. 3–8.
9. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. 1. Факторы влияния (обзор) // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. №12. С. 6–18.
10. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Антипов В.В. и др. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №1. С. 16–20.
11. Каримова С.А., Кутырев А.Е., Фомина М.А., Чесноков Д.В. Моделирование процесса воздействия агрессивных компонентов промышленной атмосферы на металлические материалы в камере солевого тумана // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-86-94.
12. Abbott W.H. A Study of Wash Intervals on Navy P3 Aircraft Using Corrosion Sensors // 2009–DOD Corrosion Conference. 2009. P. 14.
13. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Часть 2. Новые подходы к оценке коррозионности приморских атмосфер // *Коррозия: материалы, защита*. 2016. №1. С. 1–15.
14. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
15. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
16. Song H., Saraswathy V. Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A Review // *International Journal of Electrochemical Science*. 2007. Vol. 2. P. 1–28.
17. Cai J.-P., Lyon S.B. A mechanistic study of initial atmospheric corrosion kinetics using electrical resistance sensors // *Corrosion Science*. 2005. Vol. 47. No. 12. P. 2956–2973.
18. Li S., Kim Y.G., Jung S., Song H.S., Lee S.M. Application of steel thin film electrical resistance sensor for in situ corrosion monitoring // *Sensors and Actuators, B: Chemical*. 2007. Vol. 120. No. 2. P. 368–377.
19. Roblero E., Corvo F., Moo-Yam V. et al. Development and evaluation of atmospheric corrosion sensors using printed circuits // *Proceedings of EUROCORR 2014*. 2014. 631 p.
20. Prosek T., Taube M., Dubois F., Thierry D. Application of automated electrical resistance sensors for measurement of corrosion rate of copper, bronze and iron in model indoor atmospheres containing short-chain volatile carboxylic acids // *Corrosion Science*. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 87. P. 376–382.
21. Li S., Jung S., Park K., Lee S.-M., Kim Y.-G. Kinetic study on corrosion of steel in soil environments using electrical resistance sensor technique // *Materials Chemistry and Physics*. 2007. Vol. 103. No. 1. P. 9–13.

22. Yoo J.-H., Park Z.-T., Kim J.-G., Chung L. Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of the steel embedded in concrete structures: Part 1. Laboratory tests to correlate galvanic current with actual damage // *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33. No. 12. P. 2057–2062.
23. Muralidharan S., Ha T.H., Bae J.H. et al. A promising potential embeddable sensor for corrosion monitoring application in concrete structures // *Measurement*. 2007. Vol. 40. No. 6. P. 600–606.
24. Česen A., Kosec T., Legat A. Characterization of steel corrosion in mortar by various electrochemical and physical techniques // *Corrosion Science*. 2013. Vol. 75. P. 47–57.
25. Mizuno D., Suzuki S., Fujita S., Hara N. Corrosion monitoring and materials selection for automotive environments by using Atmospheric Corrosion Monitor (ACM) sensor // *Corrosion Science*. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 83. P. 217–225.
26. Demo J., Andrews C., Friedersdorf F. et al. Deployment of a wireless corrosion monitoring system for aircraft applications // *Aerospace Conference IEEE-2013*. 2013. P. 1–10.
27. Demo J., Steiner A., Friedersdorf F., Putic M. Diagnostics and Prognostics for Aircraft Structures using a Wireless Corrosion Monitoring Network // *Aerospace Conference IEEE-2010*. 2010. P. 1–9.
28. Wilson A., Vincent P., McMahon P. et al. A small, low-power, networked corrosion sensor suite // *Materials Forum*. 2008. Vol. 33. P. 36–45.
29. Авдеев Ю.П., Карпов В.А., Олышанский В.М. К вопросу формирования коррозионно-опасных условий в замкнутых объемах технических устройств // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. №7. С. 14–17.
30. Молоков М.В., Медведев И.М. Оценка чувствительности датчиков к изменению времени продолжительности увлажнения поверхности при эксплуатации в условиях умеренно теплого климата // *Новые материалы и технологии: сб. науч. статей II Российско-Казахстанской молодежной науч.-технич. конф. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та*, 2014. P. 165–171.
31. Kouril M., Prosek T., Scheffel B., Degres Y. Corrosion monitoring in archives by the electrical resistance technique // *Journal of Cultural Heritage*. Elsevier Masson SAS, 2014. Vol. 15. No. 2. P. 99–103.
32. Shitanda I., Okumura A., Itagaki M. et al. Screen-printed atmospheric corrosion monitoring sensor based on electrochemical impedance spectroscopy // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2009. Vol. 139. No. 2. P. 292–297.
33. Allahar K.N., Upadhyay V., Bierwagen G.P., Gelling V.J. Monitoring of a military vehicle coating under Prohesion exposure by embedded sensors // *Progress in Organic Coatings*. 2009. Vol. 65. No. 1. P. 142–151.
34. Bierwagen G., Tallman D., Li J. et al. EIS studies of coated metals in accelerated exposure // *Progress in Organic Coatings*. 2003. Vol. 46. No. 2. P. 148–157.
35. Wilson A.R., Muscat R.F. Novel thin wire paint and sealant degradation sensor // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011. Vol. 169. No. 2. P. 301–307.
36. Wan K., Leung C. Durability Tests of a Fiber Optic Corrosion Sensor // *Sensors*. 2012. Vol. 12. No. 3. P. 3656–3668.
37. Способ регистрации сигналов измерительных преобразователей на основе брэгговских решеток, запатентованных в едином волоконном световоде: пат. 2413259 Рос. Федерация; опубл. 10.02.06.
38. Волоконно-оптическое устройство для измерения температурного распределения (варианты): пат. 2413188 Рос. Федерация; опубл. 27.02.11.
39. Babin S.A., Ismagulov A.E., Podivilov E.V. et al. Modulation instability at propagation of narrowband 100-ns pulses in optical fibers of various types // *Laser Physics*. 2010. Vol. 20. No. 2. P. 334–340.
40. Kerrouche A., Boyle W.J.O., Gebremichael Y. et al. Field tests of fibre Bragg grating sensors incorporated into CFRP for railway bridge strengthening condition monitoring // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2008. Vol. 148. No. 1. P. 68–74.
41. Muto S., Suzuki O., Amano T., Morisawa M. A plastic optical fibre sensor for real-time humidity monitoring // *Measurement Science and Technology*. 2003. Vol. 14. No. 6. P. 746–750.
42. Ghosh S.K., Sarkar S.K., Chakraborty S. Design and development of a fiber optic intrinsic voltage sensor // *Proceedings of the 12th IMEKO TC4 international symposium Part*. 2002. Vol. 2. P. 415–419.
43. Zhao Y., Li X., Zhou X., Zhang Y. Review on the graphene based optical fiber chemical and biological sensors // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. Vol. 231. P. 324–340.
44. Raghunandhan R., Chen L.H., Long H.Y. et al. Sensors and Actuators B: Chemical Chitosan / PAA based fiber-optic interferometric sensor for heavy metal ions detection. 2016. Vol. 233. P. 31–38.
45. Yang J., Chen L.H., Zheng Y. et al. Heavy metal ions probe with relative measurement of fiber Bragg grating // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. Vol. 230. P. 353–358.
46. Benounis M., Jaffrezic-Renault N., Stremisdoerfer G., Kherrat R. Elaboration and standardization of an optical fibre corrosion sensor based on an electroless deposit of copper // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2003. Vol. 90. No. 1–3. P. 90–97.
47. Abderrahmane S., Himour A., Kherrat R. et al. An optical fibre corrosion sensor with an electroless deposit of Ni–P // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2001. Vol. 75. No. 1–2. P. 1–4.
48. Benounis M., Jaffrezic-Renault N. Elaboration of an optical fibre corrosion sensor for aircraft applications // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2004. Vol. 100. No. 1–2. P. 1–8.
49. Dong S., Liao Y., Tian Q. et al. Optical and electrochemical measurements for optical fibre corrosion sensing techniques // *Corrosion Science*. 2006. Vol. 48. No. 7. P. 1746–1756.
50. Hu W., Cai H., Yang M. et al. Fe–C-coated fibre Bragg grating sensor for steel corrosion monitoring // *Corrosion Science*. Elsevier Ltd, 2011. Vol. 53. No. 5. P. 1933–1938.
51. Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors // *Optical Fiber Technology*. 2003. Vol. 9. Issue 2. P. 57–79.
52. Lo Y.-L., Xiao F.-Y. Measurement of corrosion and temperature using a single-pitch Bragg grating fiber sensor // *Journal of intelligent material systems and structures*. 1998. Vol. 9. No. 10. P. 800–807.
53. Бабин С.А., Голушко С.К., Цыба А.М., Чейдо Г.П., Шелемба И.С., Шакиров С.Р. Концепция многофункциональной системы безопасности угольной шахты с использованием волоконно-оптических

- технологий // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. С. 95–100.
54. Волоконно-оптический линейный пожарный извещатель: пат. 2467397 Рос. Федерация; опубл. 20.11.12.
55. Gurevich É.I., Lyamin A.A., Shelemba I.S. Measurement of the temperature of a stator winding with fiber-optic sensors in bench tests of a turbogenerator // *Power Technology and Engineering*. 2010. Vol. 44. No. 3. P. 249–254.
56. Котенев В.А., Петрунин М.А., Максаева Л.Б. и др. Вакуумное окисление нанопленок свеженапленного железа // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2013. Т. 49. №4. С. 442–448.
57. Rutherford P., Ikegami R., Shrader J. et al. Novel NDE fiber optic corrosion sensor // *Proceedings of SPIE*. 1996. Vol. 2718. P. 158–169.
58. Bossi R., Criswell T., Ikegami R. et al. Novel methods for aircraft corrosion monitoring // *Proceedings of SPIE*. 1994. Vol. 2455. P. 332–335.
59. Rutherford P., Ikegami R., Shrader J. et al. Aluminum alloy clad fiber optic corrosion sensor // *Proceedings of SPIE*. 1997. Vol. 3042. P. 248–259.
60. Dong S., Liao Y., Tian Q. Intensity-based optical fiber sensor for monitoring corrosion of aluminum alloys // *Applied optics*. 2005. Vol. 44. No. 27. P. 5773–5777.
61. Babin S.A., Vlasov A.A., Shelemba I.S. Fiber-optic sensors based on Bragg gratings // *High Energy Chemistry*. 2008. Vol. 42. No. 7. P. 535–537.
62. Бабин С.А., Власов А.А., Каблуков С.И., Шелемба И.С. Сенсорная система на основе волоконно-оптических брэгговских решеток // *Вестник НГУ. Сер.: Физика*. 2007. №2. Вып. 3. С. 54–57.
63. Шишкин В.В., Гранёв И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // *Прикладная фотоника*. 2016. Т. 3. №1. С. 61–74.
64. Babin S.A., Kablukov S.I., Shelemba I.S., Vlasov A.A. An interrogator for a fiber Bragg sensor array based on a tunable erbium fiber laser // *Laser Physics*. 2007. Vol. 17. No. 11. P. 1340–1344.
65. Handawi K.A., Vahdati N., Rostron P. et al. Strain based FBG sensor for real-time corrosion rate monitoring in pre-stressed structures // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. P. 276–285.
66. Wade S.A., Wallbrink C.D., McAdam G. et al. A fibre optic corrosion fuse sensor using stressed metal-coated optical fibres // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2008. Vol. 131. No. 2. P. 602–608.
67. Zheng X., Hu W., Zhang N., Gao M. Optical corrosion sensor based on fiber Bragg grating electroplated with Fe–C film // *Optical Engineering*. 2014. Vol. 53. No. 7. P. 077104.
68. Martins-Filho J.F., Fontana E., Guimarães J. et al. Fiber-optic-based corrosion sensor using OTDR // *Proceedings of IEEE Sensors*. 2007. P. 1172–1174.
69. Martins-Filho J.F., Fontana E. Optical Fibre Sensor System for Multipoint Corrosion Detection // *Optical Fiber New Developments* / ed. Lethien C. InTech, 2009. P. 586.
70. Kulchin Y.N., Vitrik O.B., Dyshlyuk A.V., Shalagin A.M., Babin S.A., Shelemba I.S., Vlasov A.A. Combined time-wavelength interrogation of fiber-Bragg gratings based on an optical time-domain reflectometry // *Laser Physics*. 2008. Vol. 18. No. 11. P. 1301–1304.
71. Shahpir R., Sabouri S.G., Khorsandi A. Laser-based multichannel fiber optic sensor for multipoint detection of corrosion // *Optica Applicata*. 2016. Vol. XLVI. No. 1. P. 103–115.
72. Qiu Z., Luo Y., Song S. The formation of pure aluminum corrosion sensing film on fiber and its electrochemical performance // *Materials and Corrosion*. 2007. Vol. 58. No. 2. P. 109–112.
73. Dong S., Liao Y., Tian Q. Sensing of corrosion on aluminum surfaces by use of metallic optical fiber // *Applied optics*. 2005. Vol. 44. No. 30. P. 6334–6337.
74. Li X.M., Chen W.M., Huang Z.Q. et al. Fiber Optic Corrosion Sensor Fabricated by Electrochemical Method // *Proceedings of SPIE*. 1998. Vol. 3330. P. 126–133.
75. Derinkuyu S., Ertekin K., Oter O. et al. Fiber optic pH sensing with long wavelength excitable Schiff bases in the pH range of 7,0–12,0 // *Analytica Chimica Acta*. 2007. Vol. 588. No. 1. P. 42–49.
76. Panova A.A., Pantano P., Walt D.R. In situ fluorescence imaging of localized corrosion with a pH-sensitive imaging fiber // *Analytical chemistry*. 1997. Vol. 69. No. 8. P. 1635–1641.
77. Szunerits S., Walt D.R. Aluminum surface corrosion and the mechanism of inhibitors using pH and metal ion selective imaging fiber bundles // *Analytical Chemistry*. 2002. Vol. 74. No. 4. P. 886–894.
78. Dong S., Luo M., Peng G., Cheng W. Broad range pH sensor based on sol-gel entrapped indicators on fibre optic // *Sensors and Actuators, B: Chemical*. 2008. Vol. 129. No. 1. P. 94–98.
79. Котенев В.А., Петрунин М.А., Максаева Л.Б., Соколова Н.П., Горбунов А.М., Каблов Е.Н., Цивадзе А.Ю. Гравиметрия, резистометрия и инфракрасная Фурье-спектроскопия в контроле агрессивности воздушной атмосферы с использованием сенсорного слоя металл-оксидного нанокompозита железа // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2013. Т. 49. №5. С. 540–548.
80. Kotenev V.A., Tsivadze A.Y. Fiber-Optical Spectroscopy for Monitoring the Electro-Oxidation of Metals // *Measurement Techniques*. 2014. Vol. 56. No. 10. P. 1134–1139.
81. Kotenev V.A., Tsivadze A.Y. Probe Raman spectroscopy in monitoring the electrical degradation of thin-film conductors // *Measurement Techniques*. 2012. Vol. 54. No. 12. P. 1421–1426.
82. Gagina I.A., Sokolova N.P., Platonova N.P. et al. Fourier transform infrared spectroscopy in long-term corrosion monitoring of the interaction between a commercial aluminum sheet and carbon tetrachloride at room temperature // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2012. Vol. 48. No. 5. P. 591–595.
83. McAdam G., Newman P.J., McKenzie I. et al. Fiber Optic Sensors for Detection of Corrosion within Aircraft // *Structural Health Monitoring*. 2005. Vol. 4. No. 1. P. 47–56.
84. Venancio P.G., Cottis R.A., Narayanaswamy R., Fernandes J.C.S. Optical sensors for corrosion detection in airframes // *Sensors and Actuators B: Chemical*. Elsevier B.V., 2013. Vol. 182. P. 774–781.
85. Yeo T.L., Sun T., Grattan K.T.V. Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2008. Vol. 144. No. 2. P. 280–295.
86. Venugopalan T., Sun T., Grattan K.T.V. Long period grating-based humidity sensor for potential structural health monitoring // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2008. Vol. 148. No. 1. P. 57–62.

87. Usha S.P., Mishra S.K., Gupta B.D. Fiber optic hydrogen sulfide gas sensors utilizing ZnO thin film/ZnO nanoparticles: A comparison of surface plasmon resonance and lossy mode resonance // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2015. Vol. 218. P. 196–204.
88. Rodríguez-Fernández J., Pereiro R., Sanz-Medel A. Optical fibre sensor for hydrogen sulphide monitoring in mouth air // *Analytica Chimica Acta*. 2002. Vol. 471. No. 1. P. 13–23.
89. Choi M.M.F., Hawkins P. Development of an optical hydrogen sulphide sensor // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2003. Vol. 90. No. 1–3. P. 211–215.
90. Mishra S.K., Rani S., Gupta B.D. Surface plasmon resonance based fiber optic hydrogen sulphide gas sensor utilizing nickel oxide doped ITO thin film // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014. Vol. 195. P. 215–222.
91. Grant S.A., Satcher J.H., Bettencourt K. Development of sol-gel-based fiber optic nitrogen dioxide gas sensors // *Sensors and Actuators*. 2000. Vol. 69. P. 132–137.
92. Mechery S.J., Singh J.P. Fiber optic based gas sensor with nanoporous structure for the selective detection of NO₂ in air samples // *Analytica Chimica Acta*. 2006. Vol. 557. No. 1–2. P. 123–129.
93. Wong Y.M., Scully P.J., Bartlett R.J. et al. Plastic optical fibre sensors for environmental monitoring: Bio-fouling and strain applications // *Strain*. 2003. Vol. 39. No. 3. P. 115–119.
94. Ganesh A.B., Radhakrishnan T.K. Fiber-optic sensors for the estimation of oxygen gradients within biofilms on metals // *Optics and Lasers in Engineering*. 2008. Vol. 46. No. 4. P. 321–327.
95. Ganesh A.B., Radhakrishnan T.K. Fiber-optic sensor for the estimation of microbial corrosion of metals // *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*. 2009. Vol. 120. No. 10. P. 479–483.
96. Estella J., de Vicente P., Echeverría J.C., Garrido J.J. A fibre-optic humidity sensor based on a porous silica xerogel film as the sensing element // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2010. Vol. 149. No. 1. P. 122–128.
97. Zhao Z., Duan Y. A low cost fiber-optic humidity sensor based on silica sol-gel film // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2011. Vol. 160. No. 1. P. 1340–1345.
98. Chen L.H. et al. Chitosan based fiber-optic Fabry-Perot humidity sensor // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2012. Vol. 169. P. 167–172.
99. Wang Y., Shen C., Lou W., Shentu F. Fiber optic humidity sensor based on the graphene oxide/PVA composite film // *Optics Communications*. Elsevier, 2016. Vol. 372. P. 229–234.
100. Xu W., Huang W. Bin, Huang X.G., Yu C.Y. A simple fiber-optic humidity sensor based on extrinsic Fabry-Perot cavity constructed by cellulose acetate butyrate film // *Optical Fiber Technology*. Elsevier Inc., 2013. Vol. 19. No. 6. PART A. P. 583–586.
101. Consales M., Buosciolo A., Cutolo A. et al. Fiber optic humidity sensors for high-energy physics applications at CERN // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2011. Vol. 159. No. 1. P. 66–74.
102. Ibrahim N.B., Arsad A.Z., Yusop N., Baqiah H. The physical properties of nickel doped indium oxide thin film prepared by the sol-gel method and its potential as a humidity sensor // *Materials Science in Semiconductor Processing*. Elsevier, 2016. Vol. 53. P. 72–78.
103. Miao Y., Ma X., He Y. et al. Low-temperature-sensitive relative humidity sensor based on tapered square no-core fiber coated with SiO₂ nanoparticles // *Optical Fiber Technology*. Elsevier Inc., 2016. Vol. 29. P. 59–64.
104. Zrelli A., Bouyahi M., Ezzedine T. Simultaneous monitoring of humidity and strain based on Bragg sensor // *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. Elsevier GmbH, 2016. Vol. 127. No. 18. P. 7326–7331.
105. Soares C.G., Garbatov Y., Zayed A., Wang G. Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere // *Corrosion Science*. Elsevier Ltd, 2009. Vol. 51. No. 9. P. 2014–2026.
106. Rodríguez J., Hernández F., González J. The effect of environmental and meteorological variables on atmospheric corrosion of carbon steel, copper, zinc and aluminium in a limited geographic zone with different // *Corrosion Science*. 2003. Vol. 45. P. 799–815.
107. Gardiner C.P., Melchers R.E. Enclosed atmospheric corrosion in ship spaces // *British Corrosion Journal*. 2001. Vol. 36. No. 4. P. 272–276.
108. Ma Y., Li Y., Wang F. Corrosion of low carbon steel in atmospheric environments of different chloride content // *Corrosion Science*. Elsevier Ltd, 2009. Vol. 51. No. 5. P. 997–1006.
109. Merino M.C., Pardo A., Arrabal R. et al. Influence of chloride ion concentration and temperature on the corrosion of Mg–Al alloys in salt fog // *Corrosion Science*. Elsevier Ltd, 2010. Vol. 52. No. 5. P. 1696–1704.
110. Lam C.C.C., Mandamparambil R., Sun T. et al. Optical Fiber Refractive Index Sensor for Chloride Ion Monitoring // *IEEE Sensors Journal*. 2009. Vol. 9. No. 5. P. 525–532.
111. Patil S.S., Shaligram A.D. Refractometric Fiber Optic Sensor for Detecting Salinity of Water // *Journal of Sensor Technology*. 2013. Vol. 03. No. 03. P. 70–74.
112. Zhao Y., Zhang X., Zhao T. et al. Optical salinity sensor system based on fiber-optic array // *IEEE Sensors Journal*. 2009. Vol. 9. No. 9. P. 1148–1153.
113. Guzman-Sepulveda J.R., Ruiz-Perez V.I., Torres-Cisneros M. et al. Fiber optic sensor for high-sensitivity salinity measurement // *Photonics Technology Letters*. 2013. Vol. 25. No. 23. P. 2323–2326.
114. Guzmán-Sepúlveda J., Guzmán-Cabrera R., Torres-Cisneros M. et al. A Highly Sensitive Fiber Optic Sensor Based on Two-Core Fiber for Refractive Index Measurement // *Sensors*. 2013. Vol. 13. No. 10. P. 14200–14213.
115. Fuhr P.L., Huston D.R., MacCraith B. Embedded fiber optic sensors for bridge deck chloride penetration measurement // *Optical Engineering*. 1998. Vol. 37. No. 4. P. 1221–1228.
116. McPolin D.O., Basheer P.A.M., Long A.E. et al. Development and longer term in situ evaluation of fiber-optic sensors for monitoring of structural concrete // *Sensors Journal*. 2009. Vol. 9. No. 11. P. 1537–1545.
117. Wang J., Chen B. Experimental research of optical fiber sensor for salinity measurement // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2012. Vol. 184. P. 53–56.
118. Gentleman D.J., Booksh K.S. Determining salinity using a multimode fiber optic surface plasmon resonance dip-probe // *Talanta*. 2006. Vol. 68. No. 3. P. 504–515.
119. Woodruff M.W., Sirkis J.S. Corrosion sensing of aluminum using optical fiber // *Proceedings of SPIE*. 1994. Vol. 2191. P. 511–515.