

Исаев О.Ю., Смирнов Д.В., Пономарев А.А., Каменева А.Л., Шелемба И.С., Оглезнев А.А., Юдин Р.С. Контроль состояния уплотнения из терморасширенного графита на базе оптоволоконных технологий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 34–42. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.04

Isaev O.Yu., Smirnov D.V., Ponomarev A.A., Kameneva A.L., Shelemba I.S., Ogleznev A.A., Yudin R.S. Seals condition monitoring from thermal-extended graphite based on optical fiber technologies. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 34–42. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.04

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 20, № 4, 2018
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.04
УДК 539.3+681.586.5

**О.Ю. Исаев¹, Д.В. Смирнов¹, А.А. Пономарев^{1, 2}, А.Л. Каменева²,
И.С. Шелемба³, А.А. Оглезнев³, Р.С. Юдин³**

¹ ООО «Силур», Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

³ ООО «Инверсия-Сенсор», Пермь, Россия

**КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ УПЛОТНЕНИЯ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА
НА БАЗЕ ОПТОВОЛОКОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Посвящена актуальной на сегодняшний день проблеме диагностики критических узлов современных промышленных предприятий.

В нефтегазодобывающей, перерабатывающей и химической промышленности герметичность разъемных соединений является важным условием работоспособности оборудования. В настоящее время для обеспечения герметичности разъемных соединений широко применяются уплотнения из упруговязких материалов, в том числе из терморасширенного графита, описанного в данной статье. Своевременная диагностика состояния разъемных соединений позволяет увеличить межремонтный период оборудования.

Предложено техническое решение для контроля состояния разъемных соединений в процессе эксплуатации на базе оптоволоконных технологий. Работа носит междисциплинарный характер, содержит сведения из материаловедения и интегральной оптики.

Раскрывается конструкция уплотнения из терморасширенного графита с внедренными волоконно-оптическими датчиками. Определены информативные параметры эксперимента, позволяющие качественно отследить состояние разъемного соединения. Установлены технические характеристики интегрируемых волоконных брэгговских решеток, которые позволяют использовать их в данном эксперименте без потери сигнала, прошедшего через оптоволокно. Прокладка подвергалась обжатю на специализированном стенде до 150–400–750 Н·м. После чего в систему подавалось давление от 0 до 40 МПа с шагом 10 МПа для оценки герметичности системы. Рассмотрены зависимости выбранных информативных параметров от внешних нагрузок (момент затяжки и давление в системе). Соотнесены теоретические выкладки по напряженно-деформированному состоянию уплотнения с данными волоконно-оптических датчиков во время обжатки и подачи давления.

Экспериментально доказана работоспособность разработанного технического решения для диагностики состояния уплотнения.

Ключевые слова: терморасширенный графит, уплотнение, фланцевое соединение, волоконно-оптические датчики, волоконные брэгговские решетки, спектр, анализатор сигналов, мониторинг, герметичность, давление.

**O.Yu Isaev¹, D.V. Smirnov¹, A.A. Ponomarev^{1,2}, A.L. Kameneva²,
I.S. Shelemba³, A.A. Ogleznev³, R.S. Yudin³**

¹ Sealur, Ltd., Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³ Inversion Sensor Co., Ltd., Perm, Russian Federation

**SEALS CONDITION MONITORING FROM THERMAL-EXTENDED GRAPHITE BASED
ON OPTICAL FIBER TECHNOLOGIES**

The research work is devoted to current-day problem critical nodes diagnostics of modern industrial factories.

The leakproofness of releasable joints is an important condition of equipment performance in oil and gas, processing and chemical industries. Nowadays viscoelastic seals are commonly used to ensure the leakproofness of releasable joints. Thermal-extended graphite is relating to viscoelastic material and it described in this article. Timely diagnostics of releasable joints allows to increase turnaround interval.

Authors come up with a technical decision of monitoring condition of releasable joints during the exploitation. Decision is based on fiber – optic technologies. The research has an interdisciplinary nature, it is based on the junction of materials science and integrated optics.

Thermally expanded graphite seal design with embedded fiber-optic sensors is revealed in the article. The informative parameters of the experiment were determined, these parameters allow to accurately monitor the state of releasable joints. Technical specifications of integrable fiber Bragg gratings that allow to use fiber Bragg gratings at the experiment without signal loss passing through fiber optic. The gasket was exposed to compression on a special stand to 150 N·m – 400 N·m – 750 N·m. Then leak test is carried out by applying pressure to the system from 0 to 40 MPa with a step 10 MPa.

The dependences of the selected informative parameters on external loads (bolt torque and pressure in the system) are considered. Theoretical calculations the stress-strain condition of seals were associated with data from fiber – optic sensors during bolt tightening and pressure supply.

The efficiency of the developed technical decision for the diagnostics of the seal condition was experimentally proved.

Keywords: thermal-extended graphite, seal, fiber-optic sensor, fiber Bragg gratings, releasable joints, spectrum, signal analyzer, control, leakproofness, pressure.

Введение

Главной целью современных промышленных предприятий является достижение максимальной прибыли за счет усовершенствования существующих технологических процессов и сокращения производственных затрат. Одним из эффективных методов сокращения затрат является снижение простоя оборудования при осуществлении ремонтных и профилактических работ, т.е. увеличение межремонтного периода. Для этого требуется развитая система диагностики наиболее важных, критических узлов оборудования и аппаратов, позволяющая с высокой точностью регистрировать их состояние и прогнозировать возникновение отказов.

В нефтегазодобывающей, перерабатывающей и химической промышленности условием работоспособности оборудования является герметичность его узлов, предотвращающая их газовое или жидкостное взаимодействие со средами через разделяющие оболочки (корпуса), элементы и соединения. К числу критических узлов относятся неподвижные разъемные соединения (РС), такие как фланцевые соединения трубопроводов, сосудов, аппаратов и т.д. В настоящее время для обеспечения герметичности РС широко применяются уплотнения из терморасширенного графита (ТРГ). Общеизвестны следующие положительные свойства уплотнений ТРГ:

- термостойкость;
- низкий коэффициент трения;
- химическая инертность;
- отсутствие токсичности;
- стабильность механических свойств и объема в течение всего срока эксплуатации;
- износостойкость и сопротивление экструированию;
- доступная стоимость [1].

Однако на практике невозможно полностью исключить вероятность отказов РС, но можно свести их к минимуму с помощью систем диагностики. Большим потенциалом в этом направлении обладают оптоволоконные технологии, позволяющие измерять практически любые физические вели-

чины: температуру, давление, напряженность поля, деформацию, скорость, перемещение и др. [2–7]. Преимуществами волоконно-оптических датчиков (ВОД) являются малые размеры, позволяющие без труда интегрировать их в структуру материала; высокая чувствительность, защищенность от воздействия электромагнитных полей, пожаровзрывобезопасность, устойчивость к вибрациям и ударам, возможность установки измерительной аппаратуры для снятия показаний на значительном (десятки километров) расстоянии от места установки датчиков [8]. В качестве чувствительного элемента ВОД чаще всего применяется волоконная брэгговская решетка (ВБР) [9–10]. В основе работы волоконно-оптического датчика лежит изменение периода ВБР при воздействии на нее деформацией или температурой, при этом наблюдается изменение резонансной длины волны ВБР.

Смещение резонансной длины волны при продольной деформации

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_B(\epsilon) &= \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{d\epsilon} + \frac{1}{n} \frac{dn}{d\epsilon} \right) \lambda_B \epsilon = \\ &= (1 - \rho_e) \lambda_B \epsilon = \beta_e \lambda_B \epsilon, \end{aligned}$$

где ρ_e – эффективный фотоэлектрический коэффициент волокна ($\approx 0,22$); β_e – деформационная чувствительность решетки ($\approx 0,78$).

Внедрение ВБР в полимерные композиционные материалы [11] является одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы. Последние достижения в данной области описаны в обзорных статьях [12–14]. Помимо композитов исследуется интеграция ВБР в структуру бетона [15, 16], силикона [17], металла [18] и объектов, созданных с использованием аддитивных технологий [19]. Необычный способ детектирования, отклеивания в сотовых сэндвич-панелях предлагается в работе Minakuchi [20]. Способ основан на изменении спектра ВБР, встроенной в клеевой слой.

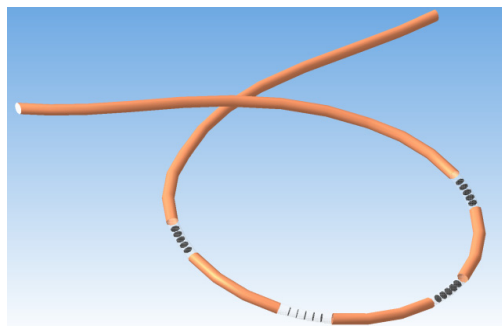
Цель данной работы – разработка технического решения для контроля состояния РС в процессе эксплуатации на базе оптоволоконных технологий.

Материалы и методики исследований

В качестве предмета исследований выбраны прокладки из ТРГ ПУТГ-2-100-01-146×60-3,0 ТУ 5728-006-93978201–2008 с интегрированной линией из четырех волоконных брэгговских решеток¹, записанных на специальном оптическом волокне FS031 (1/1-1-2) (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Прокладка из ТРГ с интегрированной ВБР:
а – общий вид; б – линии ВБР

Прокладки изготовлены из графитового листового материала посредством вырезки². Параметры прокладки перед проведением испытаний: толщина прокладки $h_{\text{ср}} = 3,17$ мм, наружный диаметр $D = 146$ мм, внутренний диаметр $d = 60$ мм, масса $m = 40,53$ г, плотность $\rho = 0,92$ г/см³. Геометрические размеры прокладки обусловлены размерами зеркала фланца. Выбор толщины прокладки основан на материале фланца и его состоянии. Для неметаллических (мягких) прокладок был выбран тончайший материал, способный компенсировать неоднородности фланца³.

¹ ТУ ДСАЕ.203729.001. Волоконная Брэгговская решетка F112. Технические условия. Введ. 2014–17–07. М., 2013. 28 с.

² ТУ 5728-006-93978201–2008. Прокладки уплотнительные из терморасширенного графита (ПУТГ). Технические условия. Введ. 2008–03–04. М., 2007. 56 с.

³ Gasket handbook / Published by Fluid Sealing Association, European Sealing Association. 2017. 138 p.

За информативные параметры эксперимента были выбраны мощность проходящего сигнала ($P_{\text{сп}}$) и изменение длины волны ВБР (λ), регистрируемые анализатором сигналов. Тип используемых оптоволоконных датчиков выбран на основании ранее проведенных исследований, в которых в качестве оценочного критерия была использована форма спектра ВБР.

В эксперименте использован стенд, состоящий из анализатора сигналов волоконно-оптических датчиков ASTRO A312⁴ [24], со следующими характеристиками: ширина перестройки лазера 100 нм, точность 2 пм, разрешение 1 пм, персонального компьютера с установленным программным обеспечением ASTROSOFT для обработки и регистрации данных с анализатора сигналов, комплекта фланцев с гладкими уплотнительными поверхностями для обтяжки исследуемой прокладки и подачи давления в систему (рис. 2).



а



б



в

Рис. 2. Испытательный стенд: а – ПК с ПО ASTROSOFT; б – фланцы плоские с выступом и система подачи давления в систему; в – анализатор сигнала ASTRO A312

⁴ ТУ ДСАЕ.421000.002 Анализаторы сигналов волоконно-оптических датчиков. Технические условия. Введ. 2014–21–05. М., 2013. 37 с.

Согласно ГОСТ Р 52857.4 момент затяжки резьбовых крепежных элементов (РКЭ) и давление, оказываемое на поверхность прокладки, вычислены с использованием следующих формул:

$$M_{кр} = \frac{0,3Fd}{1000n};$$

$$p_s = \frac{F}{S},$$

где $M_{кр}$ – момент затяжки резьбовых соединений, Н·м; F – усилие на прокладке, Н; d – диаметр шпильки, мм; n – количество РКЭ; p_s – давление на поверхности прокладки, МПа; S – площадь поверхности прокладки, мм².

Во время испытаний обтяжка прокладки проведена с применением динамометрического ключа с фиксируемым моментом HOLEX и мультипликатора Gedore. Для подачи давления в систему испытательного стенда использован плунжерный насос АЭ 2.5/400К14А.

Перед установкой прокладки уплотнительные поверхности фланцев были зачищены шабером. Для надежной фиксации прокладки на поверхности фланца использована бесосновная лента-клей марки TESA 4985. Прокладка на фланце центрирована при установке. Затяжка РКЭ произведена крестообразно с последующей подтяжкой по окружности для обеспечения равномерного обжатия прокладки (рис. 3). Без влияния на эксплуатационные свойства прокладки перед проведением испытаний по внутреннему диаметру прокладки были вырезаны два отверстия для подачи давления в систему. Для измерения зазора l по плоскостям между уплотняемыми поверхностями с использованием штангенциркуля РС собрано без установленной прокладки (положение 0). Далее в РС установлена прокладка с интегрированными ВБР (рис. 4). Обжатие произведено в три обхода $M_{кр} = 150$ Н·м (первоначально), 400 Н·м (повторно), 750 Н·м (окончательно). После каждого обхода экспериментально измерена l и оценена равномерность обжатия, выполнен приближенный расчет h . При вычислении h деформация фланцев и РКЭ не учтена ввиду малости.

В ходе предварительных экспериментов было выявлено, что параметрами, несущими наиболее информативную часть, являются мощность проходящего сигнала и изменение длины волны ВБР. Данные параметры были выбраны в качестве основных для контроля состояния РС.

После достижения $M_{кр}$ расчетной величины производилась проверка герметичности РС: в систему подано давление p от 0 до 40 МПа с шагом

10 МПа. Зарегистрированы изменения $P_{sp}(p)$ и $\lambda(p)$. Для оценки воспроизводимости результатов опыта повторяли минимум 2 раза. Выдержавшей испытания считалась прокладка, если при ее испытании отсутствовало падение давления по манометру и не наблюдалось течи в месте соединения в течение всего времени выдержки при испытательном давлении. При демонтаже РКЭ ослаблены равномерно для предотвращения разрушения прокладки в связи с возможным перегибом, вызванным прилипанием прокладки к поверхности фланцев.

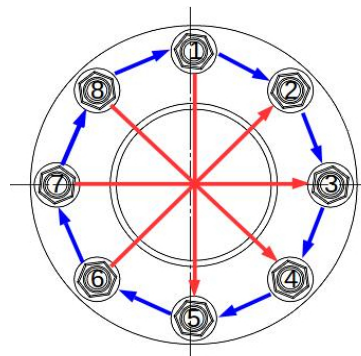


Рис. 3. Схема обжатия: крестообразно (1–5, 7–3, 8–4, 6–2); по окружности до необходимого момента



а



б

Рис. 4. Прокладка из ТРГ с интегрированными ВБР на поверхности фланца испытательного стенда: а – начало испытаний; б – окончание испытаний

Результаты эксперимента и их анализ

На основании результатов эксперимента (таблица) установлены зависимости $P_{sp}(M_{кр})$ и $\lambda(M_{кр})$. Общий вид спектра до и после обжатия уплотнения представлен на рис. 5. Интегрированные в прокладку ВБР испытывают нагрузки, идентичные нагрузкам на уплотнение. В процессе затяжки шпилек ВБР регистрирует изменения нагрузки, локализованной в зоне РКЭ, который подвергается воздействию в данный момент. На основании этих данных возможна организация контроля параллельности плоскостей РС.

Существует так называемый нейтральный радиус (рис. 6). Это радиус, на котором нет радиальной деформации при осевом нагружении [21].

Согласно исследованиям Г.В. Божко, нейтральный радиус располагается вблизи внутреннего радиуса уплотнения [22]. Ввиду того, что ВБР были интегрированы по центру поля прокладки (на большем радиусе, чем нейтральный), на них действуют растягивающие кольцевые напряжения. При данном типе напряжений меняются геометрические размеры решетки, в том числе ее период. Намного меньшее влияние при растяжении ВБР играет изменение показателя преломления за счет эффекта фотоупругости. Однако при сдвливании поперек оптического волокна изменение показателя преломления вызывает не только изменение брэгговской длины волны λ , но также может вызывать изменение мощности проходящего сигнала P_{sp} (рис. 7).

Влияние момента затяжки резьбовых соединений $M_{кр}$ при $p = 0$ на мощность проходящего сигнала и длину волны ВБР, внедренных в прокладку

№ п/п	$M_{кр}, Н·м$	$l, мм$ (с I по IV плоскости)	$h, мм$	$p_s, МПа$	$P_{sp}, дБ$	$\lambda, нм$	$\Delta\lambda, нм$
1	0	12,09	3,15	0	-18,87	1520,705	0,000
		12,02	3,16		-19,28	1540,085	0,000
		11,92	3,15		-19,37	1559,630	0,000
		11,92	3,18		-18,74	1579,810	0,000
2	150	10,91	1,97	3,23	-19,63	1521,855	1,150
		10,95	2,09		-20,10	1541,950	1,865
		10,87	2,1		-19,70	1561,315	1,685
		10,88	2,14		-19,42	1581,010	1,201
3	400	10,46	1,52	8,6	-24,75	1523,485	2,780
		10,36	1,5		-23,15	1545,185	5,100
		10,39	1,62		-21,48	1561,550	1,920
		10,24	1,5		-23,47	1581,705	1,895
4	750	10,1	1,16	16,13	-24,09	1522,405	1,700
		9,81	0,95		-26,58	1543,890	3,805
		9,87	1,1		-30,28	1562,875	3,245
		9,83	1,09		-31,25	1582,465	2,655

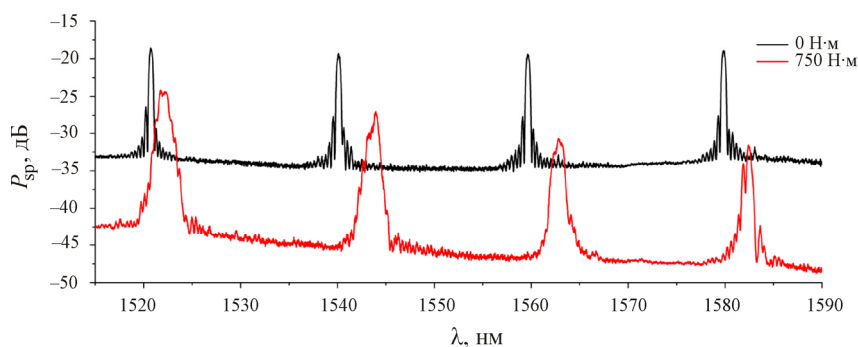


Рис. 5. Спектр ВБР, внедренных в прокладку до обжатия (0 Н·м) и после обжатия (750 Н·м)

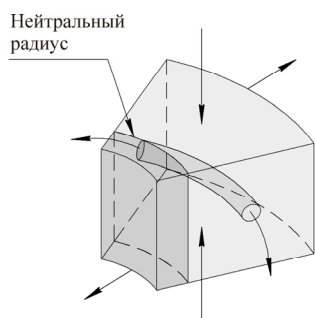


Рис. 6. Схема сил, действующих на уплотнение с интегрированными ВБР во время обтяжки

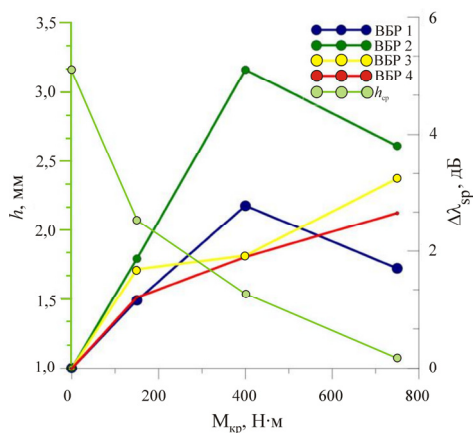
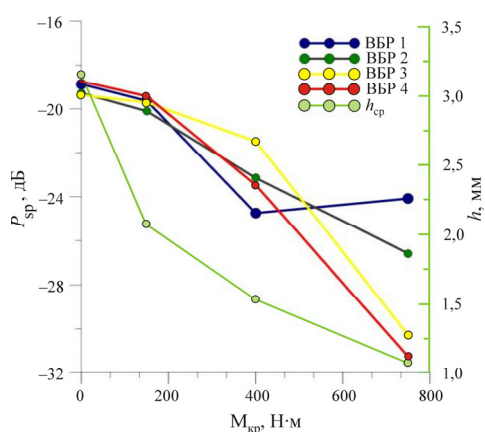


Рис. 7. Графики изменения в процессе обтяжки параметров сигнала, прошедшего через ВБР: а – мощности (P_{sp}); б – длины волны (λ)

Как можно заметить на рис. 6, с увеличением момента затяжки РКЭ длина волны ВБР увеличивается, а мощность падает. Но при максимальном достижении момента затяжки $M_{кр} = 750 \text{ Н}\cdot\text{м}$ длина волны прошедшего сигнала через ВБР 1 и 2 падает, а мощность сигнала ВБР 1 возрастает. Данные изменения параметров свидетельствуют о разгрузке прокладки в местах установки датчиков вследствие перекоса фланца.

В процессе обжатия на прокладку действуют осевые нагрузки, под действием которых она деформируется в осевом (уменьшение h) и радиальном (увеличение D и уменьшение d) направлениях. Данные изменения геометрических размеров подтверждены обмерами прокладки после испытаний относительно первоначальных размеров: $h_{cp} = 1,68$ (уменьшилась на 47 %) мм; $D = 147,6$ (увеличился на 1,1 %) мм; $d = 59,2$ мм (уменьшился на 1,3 %); $m = 40,53$ г; $\rho = 1,68 \text{ г/см}^3$ (увеличилась на 82,3 %).

Графики зависимости длины волны ВБР и мощности проходящего сигнала от подаваемого в систему давления представлены на рис. 8. На графиках видно обратное поведение характеристик сигнала относительно процесса обтяжки. Происходит разгрузка фланца при подаче давления. В рабочем состоянии под действием p нагрузка на РКЭ увеличивается, а F уменьшается [23]. Кольцевые напряжения меняют свой характер на противоположный. Перекос фланца в зоне расположения ВБР 1 влияет на поведение датчика также и при подаче давления.

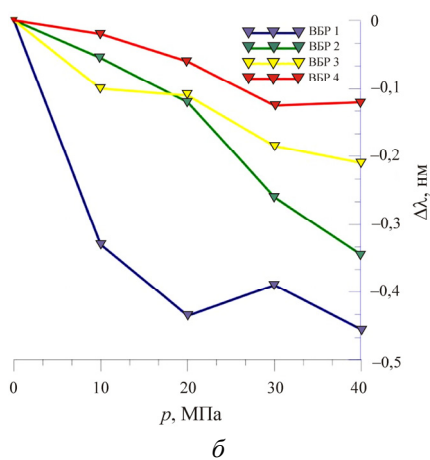
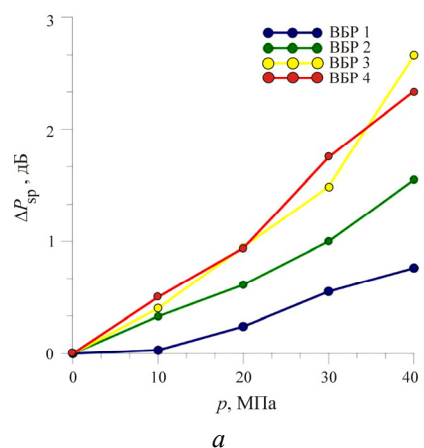


Рис. 8. Графики зависимости от давления в системе (p) параметров проходящего сигнала: а – мощности (ΔP_{sp}); б – длины волны ($\Delta\lambda$)

Прокладка из ТРГ с интегрированными ВБР после монтажа и проверки герметичности не повреждена (см. рис. 4).

Выводы

Компанией «Силур» совместно с компанией «Инверсия-Сенсор» при участии представителей ПНИПУ было разработано уплотнение из ТРГ с интегрированными волоконно-оптическими датчиками в качестве технического решения для диагностики РС во время эксплуатации.

Выявлено, что ВБР, интегрированные в структуру прокладки из ТРГ, не влияют на ее прочностные характеристики.

Проведенный эксперимент подтвердил правильность выбора мощности проходящего сигнала и изменения длины волны ВБР в качестве основных параметров для контроля состояния РС. Предложенные информативные параметры позволяют отслеживать влияние внешних воздействий (внутреннее давление системы и момент затяжки РКЭ РС) на состояние уплотнения и РС в целом.

Можно выделить несколько задач, решение которых позволит в дальнейшем создавать принципиально новые системы мониторинга промышленных объектов и тем самым повышать их безопасность и эффективность:

- разработка серийной методики установки уплотнений с внедренными ВБР в различные типы РС;
- создание системы регистрации протечки в РС;
- разработка алгоритмов прогнозирования надежности и состояния уплотнения по накапливаемым данным.

Использование уплотнений из ТРГ с внедренными ВБР позволит свести к минимуму отказы оборудования и масштабы их последствий.

Список литературы

1. Модифицированные уплотнения из терморасширенного графита / М.Ю. Белова, И.А. Малкова, Т.М. Кузинова [и др.] // Арматуростроение. – 2006. – № 3. – С. 67–71.
2. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы / Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов [и др.] // Фотон-экспресс. – 2005. – № 6. – С. 114–127.
3. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
4. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Исихара, К. Коома, К. Хаттэ. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с.
5. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В.Б. Гармаш, Ф.А. Егоров [и др.] // Фотон-экспресс. – 2005. – № 6. – С. 128–140.

6. Шишкин В.В., Гранев И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 61–75.
7. Фитисова Н.Е., Зеленская К.М. Развитие оптоволоконных технологий в России // Евразийский научный журнал. – 2015. – № 12. – С. 373–374.
8. Волоконно-оптические датчики: вводный курс для инженеров и научных работников / под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
9. Fiber grating sensors / A.D. Kersey [et al.] // J. of Lightwave Techn. – 1997. – Vol. 15, № 8. – P. 1442–1463.
10. Бабин С.А., Власов А.А., Шелемба И.С. Волоконно-оптические сенсоры на основе брэгговских решеток // Химия высоких энергий. – 2008. – Т. 42, № 4. – С. 35–37.
11. Structural health monitoring system of soccer arena based on optical sensors / V.V. Shishkin, A.E. Churin, D.S. Kharenko, M.A. Zheleznova, I.S. Shelemba // Proc. SPIE 9157, 23rd Int. Conf. on Optical Fibre Sensors, 2 June 2014. – 2014. – 9157D3. DOI: 10.1117/12.2071269
12. Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials / M. Ramakrishnan [et al.] // Sensors. – 2016. – Vol. 16, № 1. – С. 99.
13. Di Sante R. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications // Sensors. – 2015. – Vol. 15, № 8. – P. 18666–18713.
14. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: Challenges and solutions / D. Kinet [et al.] // Sensors. – 2014. – Vol. 14, № 4. – P. 7394–7419.
15. An Investigation of the use of embedded fbg sensors to measure temperature and strain inside a concrete beam during the curing period and strain measurements under operational loading / C. Fernando [et al.] // Procedia Eng. – 2017. – Vol. 188. – P. 393–399.
16. Proof of concept for temperature and strain measurements with fiber bragg gratings embedded in supercontainers designed for nuclear waste storage / D. Kinet [et al.] // IEEE Trans. on Nucl. Sci. – 2016. – Vol. 63, № 3. – P. 1955–1962.
17. Bidirectional soft silicone curvature sensor based on off-centered embedded fiber bragg grating / J. Ge [et al.] // IEEE Photonics Techn. Lett. – 2016. – Vol. 28, № 20. – P. 2237–2240.
18. Zhu Z., Xiao Q. Research on the ultrasonic welding of titanium alloy after embedding fiber bragg grating sensor // Trans. on Intell. Weld. Manuf. – Singapore: Springer, 2018. – P. 91–102.
19. Study on embedding fiber Bragg grating sensor into the 3D printing structure for health monitoring / R. Li [et al.] // Optical Communication, Optical Fiber Sensors, and Optical Memories for Big Data Storage. – Int. Soc. for Optics and Photonics. – 2016. – Vol. 10158. – P. 101581K.
20. Minakuchi S., Okabe Y., Takeda N. Real-time detection of debonding between honeycomb core and facesheet using a small-diameter FBG sensor embedded in adhesive layer // J. of Sandwich Struct. & Mater. – 2007. – Vol. 9, № 1. – P. 9–33.

21. Зирдеслебен У. Деформационные характеристики уплотнительных прокладок: дис. ... канд. техн. наук / Моск. ин-т хим. машиностроения. – М., 1989. – 171 с.

22. Божко Г.В. Разъемные герметичные соединения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 404–420.

23. Продан В.Д. Герметичность разъемных соединений оборудования, эксплуатируемого под давлением рабочей среды. – Тамбов: Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2012. – 280 с.

References

1. Belova M.Iu., Malkova I.A., Kuzinov T.M. Modifitsirovannye uplotneniia iz termorasshirenogo grafita [The modified consolidations from thermoexpanded graphite]. *Armaturostroenie*, 2006, no. 3, pp. 67–71.

2. Guliaev Iu.V., Nikitov S.A. Volokonno-opticheskie tekhnologii, ustroistva, datchiki i sistemy [Fiber-optical technologies, devices, sensors and systems]. *Foton-ekspress*, 2005, no. 6, pp. 114–127.

3. Busurin V.I., Nosov Iu.R. Volokonno-opticheskie datchiki: fizicheskie osnovy, voprosy rascheta i primeniia [Fiber-optical sensors: physical bases, questions of calculation and applications]. Moscow: Ergoatomizdat, 1990, 256 p.

4. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Isikhara Kh., Kooma K., Khatte K. Volokonno-opticheskie datchiki [Fiber-optical sensors]. Leningrad: Ergoatomizdat. Leningrskoe otdelenie, 1990, 256 p.

5. Garmash V.B., Egorov F.A. Vozmozhnosti, zadachi i perspektivy volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh sistem v sovremennom priborostroenii [Opportunities, tasks and prospects of fiber-optical measuring systems in modern instrument making]. *Fotonekspress*, 2005, no. 6, pp. 128–140.

6. Shishkin V.V., Granev I.V., Shelemba I.S. Otechestvennyi opyt proizvodstva i primeniia volokonno-opticheskikh datchikov [Domestic experience of production and use of fiber-optical sensors]. *Prikladnaia fotonika*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 61–75.

7. Fitsova N.E., Zelenskaia K.M. Razvitie optovolokonnykh tekhnologii v Rossii [Development of fiber-optic technologies in Russia]. *Evrasiiskii nauchnyi zhurnal*, 2015, no. 12, pp. 373–374.

8. Volokonno-opticheskie datchiki: vvodnyi kurs dlia inzhenerov i nauchnykh rabotnikov [Fiber-optical sensors: an introduction course for engineers and scientists]. Ed. E. Udda. Moscow: Tekhnosfera, 2008, 520 p.

9. Kersey A.D. et al. Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, vol. 15, iss. 8, pp. 1442–1463.

10. Babin C.A., Vlasov A.A., Shelemba I.S. Volokonno-opticheskie sensory na osnove breggovskikh reshetok [Fiber-optical sensors on the basis of Bragg lattices]. *Khimiia vysokikh energii*, 2008, vol. 42, no. 4, pp. 35–37.

11. Shishkin V.V., Churin A.E., Kharenko D.S., Zheleznova M.A., Shelemba I.S. Structural health monitoring system of soccer arena based on optical sensors. *Proc. SPIE 9157, 23rd Int. Conf. on Optical Fibre Sensors, 2 June 2014*. 2014. – 9157D3. DOI: 10.1117/12.2071269

12. Ramakrishnan M. et al. Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 99.

13. Di Sante R. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications. *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 8, pp. 18666–18713.

14. D. Kinet et al. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: Challenges and solutions. *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 7394–7419.

15. Fernando C. et al. An Investigation of the use of embedded fbg sensors to measure temperature and strain inside a concrete beam during the curing period and strain measurements under operational loading. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 188, pp. 393–399.

16. Kinet D. et al. Proof of concept for temperature and strain measurements with fiber bragg gratings embedded in supercontainers designed for nuclear waste storage. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 2016, vol. 63, no. 3, pp. 1955–1962.

17. Ge J. et al. Bidirectional soft silicone curvature sensor based on off-centered embedded fiber bragg grating. *IEEE Photonics Technology Letters.*, 2016, vol. 28, no. 20, pp. 2237–2240.

18. Zhu Z., Xiao Q. Research on the ultrasonic welding of titanium alloy after embedding fiber bragg grating sensor. *Trans. on Intell. Weld. Manuf.* Singapore: Springer, 2018, pp. 91–102.

19. Li R. et al. Study on embedding fiber Bragg grating sensor in-to the 3D printing structure for health monitoring. *Optical Communication, Optical Fiber Sensors, and Optical Memories for Big Data Storage. Int. Soc. for Optics and Photonics*, 2016, vol. 10158, pp. 101581K.

20. Minakuchi S., Okabe Y., Takeda N. Real-time detection of debonding between honeycomb core and facesheet using a small-diameter FBG sensor embedded in adhesive layer. *Journal of Sandwich Struct. & Mater.*, 2007, vol. 9, no. 1, pp. 9–33.

21. Zirdesleben U. Deformatsionnye kharakteristiki uplotnitel'nykh prokladok [Deformation characteristics of sealing laying]. Ph. D. thesis. Moscow, 1989, 171 p.

22. Bozhko G.V. Raz'emnye germetichnye soedineniia [Detachable tight connections]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 404–420.

23. Prodан V.D. Germetichnost' raz'emnykh soedinenii oborudovaniia, ekspluatiruemogo pod davleniem rabochei sredy [Tightness of detachable connections of the equipment operated under pressure of a working environment]. *Izdatel'stvo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, 280 p.

Получено 19.10.18

Опубликовано 20.12.18

Об авторах

Исаев Олег Юрьевич (Пермь, Россия) – генеральный директор ООО «Силур»; e-mail: isaev@sealur.ru.

Смирнов Дмитрий Вениаминович (Пермь, Россия) – второй заместитель генерального директора ООО «Силур»; e-mail: smirnov@sealur.ru.

Пonomarev Анатолий Александрович (Пермь, Россия) – инженер-технолог ООО «Силур», аспирант кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: ponomarev@sealur.ru.

Каменева Анна Львовна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры инновационных технологий машиностроения, заместитель заведующего базовой кафедрой специального машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: annkam789@mail.ru.

Шелемба Иван Сергеевич (Пермь, Россия) – первый заместитель генерального директора – Главный конструктор ООО «Инверсия-Сенсор»; e-mail: shelemba@i-sensor.ru.

Оглезнев Андрей Алексеевич (Пермь, Россия) – технический директор ООО «Инверсия-Сенсор»; e-mail: ogleznev@i-sensor.ru.

Юдин Роман Сергеевич (Пермь, Россия) – инженер-технолог второй категории ООО «Инверсия-Сенсор»; e-mail: yudin@i-sensor.ru.

About the authors

Oleg Yu. Isaev (Perm, Russian Federation) – General Director, LLC “Sealur”; e-mail: isaev@sealur.ru.

Dmitry V. Smirnov (Perm, Russian Federation) – Second Deputy General Director, LLC “Sealur”; e-mail: smirnov@sealur.ru.

Anatoly A. Ponomarev (Perm, Russian Federation) – Process Engineer, LLC “Sealur”, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: ponomarev@sealur.ru.

Anna L. Kameneva (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Innovative Engineering Technology, Deputy Head of the Basic Department of Special Engineering, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: annkam789@mail.ru.

Ivan S. Shelemba (Perm, Russian Federation) – First Deputy General Director – Chief Designer, “Inversion Sensor Co.”, Ltd.; e-mail: shelemba@i-sensor.ru.

Andrey A. Ogleznev (Perm, Russian Federation) – Technical Director, “Inversion Sensor Co.”, Ltd.; e-mail: ogleznev@i-sensor.ru.

Roman S. Yudin (Perm, Russian Federation) – Process Engineer Second Category, “Inversion Sensor Co.”, Ltd.; e-mail: yudin@i-sensor.ru.