ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С ТРЕЩИНАМИ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

ENSURING COTROL OF SAFE FUNCTIONING FOR FACILITIES WITH CRACKS USING ACOUSTIC EMISSION METHOD

И. Р. Сунгатуллин
Iskander R. Sungatullin

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В. А. Гафарова
Victoria A. Gafarova

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Д. Х. Махмутов
Dinar Kh. Makhmutov

ПАО «Уфаоргсинтез»,
г. Уфа, Российская
Федерация

Ufaorgsintez PJSC,
Ufa, Russian Federation

И. Р. Кузеев
Iskander R. Kuzeev

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Каждый вид оборудования для реализации нефтегазовых технологий может иметь трещины или трещиноподобные дефекты различного происхождения. Осознание этого факта требует изменения парадигмы восприятия конструкций с трещинами, и разрабатывать расчетные, расчетно-экспериментальные и экспериментальные методы оценки риска их эксплуатации. Актуальность такого подхода возрастает в связи с принятием нормативных документов в ряде промышленно развитых стран, в том числе и в России, регламентирующих работу трубопроводных систем с трещинами. Использование методов линейной и нелинейной механики разрушения позволяет определить критический размер трещины, при достижении которого она начинает расти. Внутритрубная дефектоскопия позволяет обнаруживать трещины и локализовать их местоположение с одновременным определением ее размеров. Однако опасность эксплуатации объектов с трещинами заключается в том, что окружающая среда в результате сезонных изменений может привести к накоплению энергии упругих деформаций в оболочке. Наиболее реальный способ релаксации связан с использованием трещин и трещиноподобных дефектов в качестве стока энергии через развитие трещин и образование новой поверхности. Поскольку существует опасность развития трещины даже размера ниже критического, предлагается обнаруженные дефекты заполнять композиционным материалом, а целостность последнего контролировать по сигналам акустической эмиссии. Метод акустической эмиссии применяется для контроля тензочувствительных покрытий, которые используются для особо опасных объектов при контроле труднодоступных для визуального контроля. Нами проведены эксперименты, которые показы-

Ключевые слова

трещины; композиционный
материал; прочность;
долговечность; живучесть;
акустическая эмиссия;
промышленная безопасность

вают возможность восстановления свойств стальных элементов с трещинами с использованием композиционных материалов. Одновременно исследована возможность применения метода акустической эмиссии для контроля целостности композиционного материала, находящегося в полости трещины. Показано, что метод позволяет проводить такую диагностику и требует дополнительного изучения возможности интерпретации сигналов, связанных с деформированием композиционного материала, например, с применением кластерного анализа сигналов.

Each type of equipment for oil and gas technologies can have cracks or crack-like defects of various origin. This fact makes us change the paradigm of the cracked structures are perceived with. It urges to develop design, design-and-experiment, and experiment methods of assessing the risks of their operation. Such an approach is increasingly relevant due to adopted regulatory documents in a number of industrially developed countries including Russia. These documents outline the standards for operation of cracked systems. Methods of linear and non-linear fracture mechanics allow to define the critical size of a crack after reaching which the crack will keep on expanding. Pig inspection allows to detect a fracture, its location and define its dimensions at the same time. However, it is dangerous to operate cracked facilities because the ambient environment may result in accumulating elastic strain energy in the membrane caused by seasonal changes. The most plausible method of relaxation is related to using cracks and crack-like defects as an energy sink through developing fractures and forming a new surface. Since there is still an apprehension that a crack of under-critical size may appear, it is suggested to fill in the detected defects with a composite material. The integrity of the materials is suggested to be controlled with acoustic emission signals. The acoustic emission method is applied to test strain-sensitive coatings that are used for high-hazard facilities when inspecting areas that are difficult to reach with visual inspections. We conducted experiments that showed that it is possible to recover the properties of cracked steel elements by using composite materials. At the same time, we researched a possibility to use acoustic emission method to control the integrity of the composite materials inside the fracture cavity. It is displayed that this method allows to conduct such an inspection and requires further studies. These studies should deal with a possibility to interpret signals related to the composite material deformation by using, for example, a cluster analysis of signals.

Keywords

cracks; composite material; strength; durability; survivability; acoustic emission; industrial safety

Анализ работы нефтегазового оборудования различного назначения показывает, что в них обнаруживаются трещины и трещиноподобные дефекты, размеры которых меньше критических [1]. В отечественной и зарубежной практике используют нормативные документы, которые разрешают в определенных случаях использовать некоторые виды оборудования с трещинами [2], однако нестационарность режимов эксплуатации может привести к подросту трещины до критических размеров и инициировать разрушение. В связи с этим в межремонтный период эксплуатации предлагается использовать композитные материалы, которые в жидком виде заполняют полость трещины и формируют там твердый композит [3, 4]. Композиционный материал может обеспечивать прочность объекта с трещиной, однако необходимо учитывать, что прочностные свойства композиционного ма-

териала существенно ниже, чем стали. Поэтому для удержания трещины от развития при возникновении нештатных ситуаций важно обеспечить баланс между когезионной прочностью композита и его адгезией к металлической поверхности. Как при разрушении самого композита, так и разрушении адгезионного контакта возникают акустические шумы, которые можно уловить с помощью приборов для регистрации акустической эмиссии (АЭ). Такой метод реализуется при контроле целостности защитных покрытий [5, 6]. В связи с этим были проведены исследования с регистрацией АЭ-сигналов при разрушении различных образцов. Для сравнения были подвергнуты деформированию и разрушению на растяжение целые образцы, образцы с модельными дефектами и образцы, дефекты в которых были заполнены композитным материалом. Геометрические размеры

образцов представлены на рисунке 1. В процессе разрушения образцов за поведением трещин наблюдали с помощью метода акустической эмиссии, датчики были зафиксированы на образце вне рабочей зоны (рисунок 2). Скорость деформирования составляла 4 мм/мин.

В таблице 1 представлены результаты АЭ с наложенными сверху диаграммами разрушения образцов. На рисунке 3 показаны образцы после разрушения.

Эксперименты позволяют сделать очень важный вывод о том, что композиционный

Рисунок 1. Геометрические размеры образцов

Рисунок 2. Фотографии образцов в процессе исследования

Рисунок 3. Фотографии образцов после разрушения

Таблица 1. Результаты сигналов АЭ

Цветовые обозначения точечных графиков

Количество данных в точке	1		от 8 до 15	
	от 2 до 3		от 16	
	от 4 до 7			

материал не снижает несущую способность образца с трещиноподобным дефектом, и при этом, как видно на рисунке 3 (образец 2), произошло адгезионно-когезионное разрушение, а на образцах 3 и 4 после наблюдается разрушение адгезионного контакта. Это говорит о

том, что необходимо дальнейшее изучение закономерности взаимодействия поверхностей между металлом и композитом.

Акустико-эмиссионные измерения показывают три выраженных всплеска сигналов, которые нами интерпретируются как появление

поверхностных трещин на композите. Они приурочены к нелинейной части диаграммы, это означает, что в упругой области деформирования композиционный материал выдерживает нагрузки и не разрушается. Это, в свою очередь, позволяет сделать вывод о том, что акустико-эмиссионный метод контроля позволяет отслеживать состояние композита в дефекте металла.

Для более точного определения состояния композита и адгезионной прочности связи необходимо проводить АЭ-испытания с использованием двухступенчатого нагружения. На первом этапе нагружения используется единичный цикл подъема и сброса нагрузки (для проверки работоспособности измерительной аппаратуры, уточнения уровня механических шумов, возникающих при работе электродвигателей нагружающей установки, и корректировки порога дискриминации импульсов АЭ). На втором этапе подъем давления чередуется с выдержкой и дополнительным контролем трещины альтернативными методами. Таким образом, уточняется алгоритм контроля, который должен включать метод, основанный на получении локальных стандартных отклонений сигнала акустиче-

ской эмиссии, очищенных от шумового вклада при помощи вейвлет-разложения. Данный метод обработки акустико-эмиссионных сигналов позволит также количественно описывать процесс разрушения материала и устанавливать связь между акустико-эмиссионными параметрами и механическими характеристиками материала.

Еще одним направлением исследований с применением регистрации АЭ может быть кластерный анализ, который позволяет идентифицировать импульсы от различных источников [7]. Кластерный анализ использовался, например, для идентификации стадий разрушения композиционного материала [8]. При этом выявлено три стадии разрушения.

Авторы выражают благодарность Афанасьеву Д.А. за помощь в интерпретации сигналов акустической эмиссии.

Вывод

Таким образом, показана возможность контроля за состоянием объекта при сложном нагружении с помощью объемных диаграмм, снижения уровня риска эксплуатации объекта с трещинами с помощью заполнения их композиционным материалом с АЭ-контролем их целостности.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гафарова В.А., Бабин А.Ю., Базрова Ю.В., Кузеев А.М. Влияние композиционного материала на распределение напряжений в области трещины // Современные технологии композиционных материалов: матер. IV Всерос. науч.-практ. молодежной конф. с международ. участием. Уфа: Изд-во БашГУ, 2019. С. 295–296.
2. РД-23.040.00-KTN-011-16. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Определение прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами. М.: Транснефть, 2009. 143 с.
3. Гафарова В.А. Материалы и способ заделки трещин в нефтегазовом оборудовании в межремонтный период эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. 145 с.
4. Тляшева Р.Р., Гафарова В.А., Вагазова К.Р., Кузеев А.М. Композиционный материал для заполнения полости трещин и трещиноподобных дефектов // Башкирский химический журнал. 2016. Т. 23. № 3. С. 56–62.
5. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. 362 с.
6. Хайруллина Л.Б. Обеспечение безопасности нефтегазового оборудования с использованием комбинированной диагностики: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. 154 с.
7. Бардаков В.В., Барат В.А., Терентьев Д.А., Чернов Д.В., Осипов К.О. Особенности применения метода акустической эмиссии при мониторинге мостовых

конструкций // Контроль. Диагностика. 2016. № 1. С. 32–39. DOI: 10.14489/td.2016.01.pp.032–039.

8. Чернов Д.В., Лепихин А.М., Елизаров С.В. Особенности АЭ-контроля и АЭ-критерии оценки безопасности композитных сосудов высокого давления // Территория NDT 2016: тр. сессии РАН и деловой программы форума. М.: Спектр, 2016. С. 293–294.

REFERENCES

1. Gafarova V.A., Babin A.Yu., Bazrova Yu.V., Kuzeev A.M. Vliyanie kompozitsionnogo materiala na raspredelenie napryazhenii v oblasti treshchiny [Influence of Composite Material on Stress Distribution in the Crack Area]. *Materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi molodezhnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennye tekhnologii kompozitsionnykh materialov»* [Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Youth Conference with International Participation «Modern Technologies of Composite Materials»]. Ufa, BashGU Publ., 2019, pp. 295–296. [in Russian].
2. RD-23.040.00-KTN-011-16. *Magistral'nyi truboprovodnyi transport nefi i nefteproduktov. Opredelenie prochnosti i dolgovechnosti trub i svarnykh soedinenii s defektami* [RD-23.040.00-KTN-011-16. Main Pipeline Transportation of Oil and Oil Products. Determination of Strength and Durability of Pipes and Welded Joints with Defects]. Moscow, Transneft' Publ., 2009. 143 p. [in Russian].
3. Gafarova V.A. *Materialy i sposob zadelki treshchin v neftegazovom oborudovanii v mezhremontnyi period*

ekspluatatsii: dis. kand. tekhn. nauk [Materials and Method for Sealing Cracks in Oil and Gas Equipment During the Overhaul Period: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2019. 145 p. [in Russian].

4. Tlyasheva R.R., Gafarova V.A., Vagazova K.R., Kuzeev A.M. Kompozitsionnyi material dlya zapolneniya polosti treshchin i treshchinopodobnykh defektov [Composite Material for Filling Crack and Crack-Like Defects Cavities]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal — Bashkir Chemical Journal*, 2016, Vol. 23, No. 3, pp. 56–62. [in Russian].

5. Ivanov V.I., Barat V.A. *Akustiko-emissionnaya diagnostika* [Acoustic Emission Diagnostics]. Moscow, Spektr Publ., 2017. 362 p. [in Russian].

6. Khairullina L.B. *Obespechenie bezopasnosti neftegazovogo oborudovaniya s ispol'zovaniem kombinirovannoi diagnostiki: dis. kand. tekhn. nauk* [Ensuring the Safety of Oil and Gas Equipment Using

Combined Diagnostics: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2018. 154 p. [in Russian].

7. Bardakov V.V., Barat V.A., Terentev D.A., Chernov D.V., Osipov K.O. Osobennosti primeneniya metoda akusticheskoi emissii pri monitoringe mostovykh konstrukttsii [Features of the Ae Method Application in Monitoring of Bridge Constructions]. *Kontrol'. Diagnostika — Testing. Diagnostics*, 2016, No. 1, pp. 32–39. DOI: 10.14489/td.2016.01.pp.032-039. [in Russian].

8. Chernov D.V., Lepikhin A.M., Elizarov S.V. Osobennosti AE-kontrolya i AE-kriterii otsenki bezopasnosti kompozitnykh sosudov vysokogo davleniya [Features of AE Control and AE Criteria for Assessing the Safety of Composite Pressure Vessels]. *Trudy sessii RAN i delovoi programmy foruma «Territoriya NDT 2016»* [Proceedings of the RAS Session and the Business Program of the Forum «NDT Territory 2016»]. Moscow, Spektr Publ., 2016. pp. 293–294. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Сунгатуллин Искандер Равилович, соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, председатель совета директоров холдинга «ПЕГАЗ», г. Уфа, Российская Федерация

Iskander R. Sungatullin, Applicant of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Chairman of the Board of Directors of PEGAZ Holding, Ufa, Russian Federation

e-mail: irsungatullin@gmail.com

Гафарова Виктория Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Victoria A. Gafarova, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: gafarova.vika@bk.ru

Махмутов Динар Хадисович, заместитель начальника управления технического надзора, ПАО «Уфаоргсинтез», г. Уфа, Российская Федерация

Dinar Kh. Makhmutov, Deputy Head of the Technical Supervision Department, Ufaorgsintez PJSC, Ufa, Russian Federation

e-mail: MakhmutovDKh@bashneft.ru

Кузеев Искандер Рустемович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Iskander R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: kuzeev2002@mail.ru