Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 124–133. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2021. Vol. 19, No. 6, P. 124–133. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 620.194.22

doi: 10.17122/ngdelo-2021-6-124-133

АДГЕЗИОННАЯ И КОГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С УГЛЕРОДНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ ДЛЯ ЗАДЕЛКИ ТРЕЩИН

Влада Николаевна Ильина¹, Виктория Александровна Гафарова¹,
Дмитрий Ефимович Бугай¹, Степан Викторович Ильин^{1,2},
Искандер Рустемович Кузеев¹

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

²ООО НПФ «Пакер», Уфа, Россия

Автор, ответственный за переписку

Влада Николаевна Ильина, moskovkina.vlada@mail.ru

Аннотация. Около 47 % магистральных газопроводов на территории РФ эксплуатируются более 30 лет. Число дефектных участков труб, нуждающихся в ремонте, велико, однако их полная замена не представляется возможной в связи с большой протяженностью трубопроводных сетей и необходимостью существенных материальных затрат. Применяемые на сегодняшний день технологии ремонта: вырезка и замена поврежденных участков, установка стальных муфт на дефектные области, наплавка металла методом электродуговой сварки или приварка заплаток — являются дорогими и трудоемкими. В связи с этим предлагается использовать композиционные материалы на основе эпоксидной смолы с углеродными наполнителями для заполнения полости трещин, что позволит скрепить ее берега и продолжить эксплуатировать оборудование, увеличив его живучесть.

В данной работе проводилось исследование влияния количества отвердителя, разбавителя и наполнителя в составе композиционного материала на его адгезионную и когезионную прочность. В качестве наполнителей были выбраны три аллотропные формы углерода: графен, представляющий собой двумерную структуру, углеродные нанотрубки, которые образуются путем сворачивания листов графена в полые молекулы цилиндрической формы, и фуллерен, являющийся «чистой» поверхностью с большой кривизной. Получены зависимости влияния компонентов композиционного материала на его адгезионную и когезионную прочность, интерпретация которых свидетельствует о том, что на композит с графеном в роли наполнителя влияет только количество разбавителя, на композиционный материал с наполнителем фуллерен — количество отвердителя, а на композит с углеродными нанотрубками влияние оказывают все компоненты. Это открывает возможность создания материалов для заделки трещин с заданными свойствами, что повышает эффективность ремонта газопроводных труб.

Для цитирования

Ильина В.Н., Гафарова В.А., Бугай Д.Е., Ильин С.В., Кузеев И.Р. Адгезионная и когезионная прочность композиционного материала с углеродными наполнителями для заделки трещин // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 124–133. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-124-133>.

Ключевые слова

трещины, композиционный материал, прочность, долговечность, живучесть, адгезия, когезия, коррозионное растрескивание под напряжением

Original article

ADHESIVE AND COHESIVE STRENGTH OF COMPOSITE MATERIAL WITH CARBON FILLERS FOR SEALING CRACK

Vlada N. Ilyina¹, Victoria A. Gafarova¹, Dmitriy E. Bugai¹,
Stepan V. Ilyin^{1,2}, Iskander R. Kuzeev¹

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

²SPF «Paker» LLC, Ufa, Russia

Corresponding author

Vlada N. Ilyina, moskovkina.vlada@mail.ru

Abstract. About 47 % of the main gas pipelines in the Russian Federation have been in operation for more than 30 years. The number of defective areas needing to be repaired is high. However, it is not possible to replace them completely. This is due to the huge length of the main pipeline networks and the need for significant material costs. The repair techniques used today are the following: cutting out and replacing damaged areas, mounting steel couplings on defective areas, surfacing metal by electric arc welding or welding patches. However, these techniques are expensive and labor-consuming. Therefore it is proposed to use composite materials based on epoxy resin with carbon fillers to fill the cavity of cracks. This will allow its edges to be bonded and the equipment to continue to operate, increasing its survivability.

This paper investigated the effect of the amount of hardener, thinner and filler in a composite material on its adhesion and cohesion strength. Three allotropic forms of carbon were chosen as fillers. They are graphene, carbon nanotubes and fullerene. The first one is a two-dimensional structure. The second one is formed by folding graphene sheets into hollow cylindrical molecules. The third one is a clean and strongly curved surface.

Dependencies were obtained on how the composite material components affect its adhesion and cohesion strength. Their interpretation indicates the following. Thus, a composite with graphene filler is only affected by the thinner amount. A fullerene-filled composite is affected by the hardener amount. Finally, a composite with carbon nanotubes is affected by all components. This makes it possible to create the crack sealing composite material. This in turn increases the efficiency of repairing gas pipes.

Keywords

cracks, composite material, strength, longevity, durability, adhesion, cohesion, stress corrosion cracking

For citation

Ilyina V.N., Gafarova V.A., Bugai D.E., Ilyin S.V., Kuzeev I.R. Adgezionnaya i kogeziionnaya prochnost' kompozitsionnogo materiala s uglerodnymi napolnitelyami dlya zadelki treshchin [Adhesive and Cohesive Strength of Composite Material with Carbon Fillers for Sealing Crack]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2021, Vol. 19, No. 6, pp. 124–133. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-124-133>.

На территории РФ протяженность системы магистральных газопроводов составляет более 175 тыс. км, причем около 47 % из них эксплуатируются более 30 лет [1, 2]. Удельный показатель аварийности на линейной части газопроводов в настоящее время составляет 0,02 % аварий в год на 100 км труб, с учетом общей длины газопроводов это более 30 аварий в год [3]. Анализ основных причин отказов магистральных газопроводов показал, что коррозионное растрескивание под напряжением является одним из наиболее опасных поверхностных дефектов металла магистральных газопроводов [4–6].

Многие годы наиболее распространенным решением для ремонта магистральных газопроводов являлась их полная замена. На сегодняшний день применяются такие технологии ремонта как: вырезка и замена поврежденного участка трубопровода; установка на дефектный участок свариваемой стальной муфты, в некоторых случаях ее полость заполняют компаундом; наплавка металла методом электродуговой сварки или приварка заплатки. Однако необходимость оптимизации производства в современных экономических условиях, а также большое число дефектных участков трубопроводов требуют создания способов ремонта, ко-

торые исключали бы вырезку труб и останов процесса перекачивания [7, 8].

Анализ данных зарубежных компаний свидетельствует о том, что применение композиционных материалов для ремонта трубопроводов в среднем на 73 % дешевле, чем полная замена поврежденного участка трубы [7]. В зарубежных компаниях, таких как Royal Dutch Shell, British Petroleum и AGIP, композиты нашли применение для герметизации утечек при внеплановом ремонте [9]. В связи с этим авторы работ [10–12] предлагают использовать композиционные материалы для заполнения полости трещин.

При заделке трещин необходимо, чтобы композит обладал текучестью после формования, достаточной для проникновения в узкие щели, а после затвердевания прочностные и пластические свойства материала должны обеспечивать скрепление берегов трещины [12]. Также важным фактором является соотношение адгезионной и когезионной прочности композиционного материала. Если прочность сцепления композита с металлом (адгезионная прочность) выше прочности самого материала (когезионная прочность), то разрушение при деформировании оборудования произойдет в объеме композиционного материала. Если когезионная прочность выше, чем адгезионная, то разрушение произойдет путем отрыва композита от поверхности металла. Общепринятой является следующая классификация видов разрушения: когезионное (рисунки 1, а, 1, b), адгезионное (рисунок 1, c) и смешанное (рисунок 1, d).

При создании композиционного материала в его состав включают компоненты, улучшающие те или иные свойства. В связи с этим актуальным является поиск состава композиционного материала, который обеспечивал бы заданное соотношение адгезионной и когезионной прочности.

Гипотезы адгезионного взаимодействия

Существует несколько теорий адгезионного взаимодействия [13].

Согласно механической теории адгезии, основателем которой является Мак-Бен, адгезия происходит в результате затекания адгезива в поры субстрата и его последующим затвердеванием в порах. В данном случае прочность адгезионного соединения зависит от прочности адгезива и пористости субстрата. Недостатком данной теории является отсутствие объяснения адгезии непористых тел с гладкими поверхностями.

Дебройн и Мак-Ларен в своих работах предложили молекулярную (адсорбционную) теорию адгезии, согласно которой адгезия обусловлена действием межмолекулярных сил (Ван-дер-Ваальсовых сил), взаимодействием ион — диполь или образованием водородных связей между адгезивом и субстратом. Согласно данной теории, величина адгезионного соединения тем больше, чем более близки по полярности адгезив и субстрат. Однако эта теория не может объяснить адгезионные взаимодействия между слабополярными и неполярными полимерами.

Согласно химической теории, адгезия, появляющаяся на границе раздела между адгезивом и субстратом, является образования химических связей между компонентами соединения.

Дерягин и Кротова, разработавшие электрическую теорию адгезии, сравнивали соединение «адгезив — субстрат» с обкладками электрического конденсатора, а процесс раздвижения его обкладок — с разрушением адгезионного соединения. Следовательно, соединение близких по природе компонентов должно привести к уменьшению адгезионной прочности (в результате уменьшения разности потенциалов), однако данное утверждение не нашло экспериментального подтверждения.

Рисунок 1. Характер разрушения соединения «композиционный материал — металл»

Figure 1. Fracture mode of «composite material — metal» connection

Автор диффузионной теории Воюцкий объяснял возникновение адгезионного соединения в результате диффузии макромолекул через границу раздела адгезива и субстрата с последующим образованием связи между полимерами.

Теория слабых граничных слоев, разработанная Бикерманом, исходит из предположения, что адгезионное соединение не разрушается по межфазной границе, и разрушение происходит когезионно в слабом граничном слое, который находится в зоне контакта адгезива и субстрата. Недостатком данной теории является то, что теория слабых граничных слоев не учитывает химическую структуру адгезива и субстрата.

Разнообразие гипотез адгезионного взаимодействия указывает на сложный характер этого явления. Возможно, существующие гипотезы рассматривают явление с разных сторон, основываясь на ограниченном количестве факторов. В таком случае необходимо использовать обобщающие характеристики

поверхностного слоя, например его дробно-размерное устройство [14].

Характеристика компонентов композиционного материала

Основной частью композиционного материала является эпоксидная смола, представляющая собой олигомер, содержащий не менее двух эпоксидных групп, которые располагаются на концах цепи молекулы. Данные олигомеры способны образовывать сшитые полимеры в результате химической реакции с отвердителем. В данной работе в качестве полимерной матрицы композиционного материала использовалась эпоксидно-диановая смола ЭД-20, структурная формула которой представлена на рисунке 2, механические характеристики приведены в таблице 1.

В качестве отвердителя в данной работе использовался полиэтиленполиамин (ПЭПА), структурная формула которого приведена на рисунке 3.

Рисунок 2. Структурная формула ЭД-20

Figure 2. Structural formula of ED-20

Таблица 1. Механические характеристики ЭД-20

Table 1. Mechanical characteristics of ED-20

Наименование	Эпоксидная смола ЭД-20
Плотность при 20 °С, кг/м ³	1,16–1,25
Прочность при растяжении, МПа	40–90
Прочность при изгибе, МПа	80–140
Температура полимеризации, °С	от 20
Время полной полимеризации	24 ч
Теплостойкость, °С	55–170

Рисунок 3. Структурная формула ПЭПА

Figure 3. Structural formula of PEPA

Отверждение эпоксидной смолы при использовании ПЭПА происходит при температуре 20–25 °С (рисунок 4). Взаимодействие аминогрупп отвердителя ПЭПА с эпоксидной группой ЭД-20 происходит с участием активного водорода аминогруппы.

Для улучшения свойств композиционного материала в него добавляют различные наполнители. В данной работе рассматривались углеродные наполнители: фуллерен, углеродные нанотрубки и графен.

Фуллерен (химическая формула — C_n , где n — четное целое число) представляет собой многоатомную молекулу углерода в виде объединенных пяти- и шестиугольников с общими ребрами. При взаимодействии фуллерена с другими элементами в химических реакциях он ведет себя как окислитель, и способен присоединять к себе до шести электронов [15]. Фуллерен является «чистой» поверхностью с большой кривизной, структурная формула представлена на рисунке 5, а.

Графен — это слой решетки толщиной в один атом, состоящий из атомов углерода, соединенных в шестиугольники с общими ребрами. Графен является двумерной аллотропной формой углерода и представляет собой очень легкий материал: его вес составляет 0,77 мг/м²; при этом площадь свободной поверхности — 2630 м²/г; прочность на разрыв — 42 Нм⁻¹ [16]. Структурная формула графена представлена на рисунке 5, б.

Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой свернутые листы графена, которые образуют полые молекулы цилиндрической формы. У одностенных углеродных нанотрубок прочность на разрыв достигает 63 ГПа, в то время как у стали — 1 ГПа; удельная площадь поверхности 500–1000 м²/г; термостойкость — до 2800 °С; модуль Юнга — 1–1,3 ТПа, у стали — 0,21 ТПа; теплопроводность до 6000 Вт/(м·К) [17]. Структурная формула УНТ представлена на рисунке 5, с.

В качестве разбавителя в работе использовалась магнитная жидкость на основе керосина, которая содержит магнитные частицы Fe_2O_3 порядка 10 нм. В работе [11] авторы использовали магнитную жидкость для снижения сопротивления движению при течении в узких каналах, что позволило увеличить проникающую способность композиционного материала в узкие щели.

С целью предотвращения слипания магнитных частиц в крупные агломераты в состав магнитной жидкости вводят ПАВ — стеариновую кислоту $C_{17}H_{35}COOH$, которая образует молекулярный слой толщиной 2 нм в результате притяжения полярной структуры $O-H^+$ к поверхности магнитной частицы. В неполярных дисперсионных средах, таких как керосин, гибкие неполярные концы ПАВ направлены от частицы к жидкости (рисунок 6).

Рисунок 4. Реакция отверждения эпоксидной смолы при использовании отвердителя ПЭПА

Figure 4. Reaction of epoxy resin curing when using PEPA hardener

Рисунок 5. Структурные формулы углеродных наполнителей

Figure 5. Structural formulas of carbon fillers

Рисунок 6. Частица Fe_2O_3 с адсорбированным на ней слоем ПАВ

Figure 6. Fe_2O_3 particle with a surfactant layer adsorbed on it

Экспериментальная часть

В данной работе проводился поиск состава композиционного материала с углеродным наполнителем, который обеспечивал бы заданное соотношение адгезионной и когезионной прочности.

Для исследования влияния компонентов композита на его адгезионную и когезионную прочность были проведены полные факторные эксперименты (ПФЭ). Матрицы планирования ПФЭ с их результатами приведены в таблицах 2–4.

Были выбраны следующие факторы, которые могут влиять на адгезионную и когезионную прочность композиционного материала:

x_1 — количество отвердителя (мл),
 $x_1^- = 0,25$, $x_1^+ = 0,5$;

x_2 — количество разбавителя (мл),
 $x_2^- = 0,05$, $x_2^+ = 0,15$;

x_3 — количество наполнителя (% масс.):

Таблица 2. Матрица планирования ПФЭ для композиционного материала с наполнителем фуллерен

Table 2. PFE planning matrix for composite material with fullerene filler

№	x_1	x_2	x_3	y_1 , МПа	y_2 , МПа	y_3 , МПа
1	+	+	+	5,62	4,68	4,45
2	+	+	–	6,68	3,40	4,93
3	+	–	+	4,90	3,88	5,36
4	+	–	–	7,44	6,80	3,36
5	–	+	+	7,31	8,07	6,11
6	–	+	–	9,50	6,26	3,03
7	–	–	+	6,83	5,24	5,64
8	–	–	–	8,93	6,00	4,11

Таблица 4. Матрица планирования ПФЭ для композиционного материала с наполнителем УНТ

Table 4. PFE planning matrix for composite material with CNT filler

№	x_1	x_2	x_3	y_1 , МПа	y_2 , МПа	y_3 , МПа
1	+	+	+	5,39	5,22	5,58
2	+	+	–	5,66	5,40	6,31
3	+	–	+	6,20	5,81	4,68
4	+	–	–	3,29	5,73	5,13
5	–	+	+	6,55	1,90	4,22
6	–	+	–	2,15	2,73	1,58
7	–	–	+	2,18	2,79	1,63
8	–	–	–	3,08	3,88	5,63

для графена и фуллерена: $x_3^- = 0,5$, $x_3^+ = 5$;

для УНТ: $x_3^- = 0,05$, $x_3^+ = 0,5$;

y — прочность композита при сдвиге.

Количество эпоксидной смолы во всех экспериментах оставалось неизменным — 2,5 мл.

Для проведения эксперимента по ГОСТ Р 57834-201 были изготовлены металлические пластины из стали 09Г2С, изображенные на рисунке 7. Перед началом испытаний поверхность всех образцов очищалась и обрабатывалась абразивной бумагой до необходимой шероховатости.

После смешивания всех компонентов композиционного материала в заданных пропорциях он наносился на поверхность одной металлической пластины, которая совмещалась со второй таким образом, чтобы зона нахлеста составляла 30 мм (рисунок 8). Полученные соединения выдерживались до полного отверждения композита.

Таблица 3. Матрица планирования ПФЭ для композиционного материала с наполнителем графен

Table 3. PFE planning matrix for composite material with graphene filler

№	x_1	x_2	x_3	y_1 , МПа	y_2 , МПа	y_3 , МПа
1	+	+	+	7,19	5,41	4,63
2	+	+	–	4,73	7,13	5,11
3	+	–	+	4,44	4,66	6,52
4	+	–	–	2,40	4,77	4,52
5	–	+	+	6,42	10,84	8,39
6	–	+	–	5,70	4,03	6,57
7	–	–	+	4,85	5,15	4,12
8	–	–	–	3,15	8,24	4,64

Рисунок 7. Внешний вид образца

Figure 7. Appearance of the sample

Для испытания композиционного материала на адгезионную прочность образец устанавливался в захваты разрывной машины ИР 5113-100 (рисунок 9, *a*) и нагружался на сдвиг (рисунок 9, *b*). Растяжение продолжалось до полного разрушения соединения двух пластин, величина нагрузки на образец регистрировалась и заносилась в протокол испытания.

Полученные результаты представлены в таблицах 2–4. Внешний вид образцов после испытания на прочность при сдвиге представлен на рисунке 10.

Проанализировав характер разрушения композиционных материалов, пришли к выводу, что преобладает адгезионно-когезионный характер разрушения образцов. При адгезионном разрушении композиционный материал остается либо полностью на одной стороне образца (рисунок 10, *b*), либо частично на обеих сторонах (рисунок 10, *a*). При адгезионно-когезионном — частичный отрыв композита от поверхности металла и частичное разрушение самого материала, причем доля адгезионного и когезионного разрушения может быть разной (рисунок 10, *c*, *d*).

Рисунок 8. Нанесение композиционного материала

a)

b)

Рисунок 9. Проведение испытания на сдвиг

Figure 8. Application of composite material

Figure 9. Performing a shear test

a)

b)

c)

d)

a), *b*) адгезионный характер разрушения; *c*) адгезионно-когезионный характер разрушения, доля адгезионного разрушения $\approx 70\%$, доля когезионного разрушения $\approx 30\%$; *d*) адгезионно-когезионный характер разрушения, доля адгезионного разрушения $\approx 20\%$, доля когезионного разрушения $\approx 80\%$

a), *b*) adhesive fracture mode; *c*) adhesive-cohesive fracture mode, coverage of adhesive fracture $\approx 70\%$, coverage of cohesive fracture $\approx 30\%$; *d*) adhesive-cohesive nature of failure, coverage of adhesive fracture $\approx 20\%$, coverage of cohesive fracture $\approx 80\%$

Рисунок 10. Образцы после испытания на прочность при сдвиге

Figure 10. Samples after shear strength test

По полученным в ходе проведения экспериментов результатам построили уравнения регрессии, в которых учитываются все взаимодействия факторов. После этого полученные уравнения были проверены на адекватность. Далее была проведена их интерпретация, приведенная ниже.

Композиционный материал с наполнителем графен:

$$y = 5,57 + 0,78x_2. \quad (1)$$

По уравнению (1) видно, что на прочность композита при сдвиге с наполнителем графен оказывает влияние только количество разбавителя — фактор x_2 . Коэффициент перед положительный, что означает увеличение адгезионной и уменьшение когезионной прочности при увеличении количества разбавителя в составе композита.

Композиционный материал с наполнителем фуллерен:

$$y = 5,77 - 0,65x_1. \quad (2)$$

На прочность композиционного материала при сдвиге с наполнителем фуллерен влияет только фактор x_1 — количество отвердителя в составе композиционного материала. Коэффициент в уравнении (2) перед фактором отрицательный, что означает уменьшение адгезионной и увеличение когезионной прочности композиционного материала при увеличении количества отвердителя.

Композиционный материал с наполнителем УНТ:

$$y = 4,28 + 1,09x_1 - 0,66x_1x_2x_3. \quad (3)$$

Наибольший по абсолютной величине коэффициент в уравнении (3) перед фактором x_1 — количество отвердителя. Это означает, что данный фактор оказывает наибольшее влияние на прочность композиционного материала при сдвиге с наполнителем УНТ. После него по силе влияния на отклик идет взаимодействие факторов $x_1x_2x_3$ — количество отвердителя, разбавителя и наполнителя. Коэффициент перед фактором положительный, что означает увеличение адгезионной и уменьшение когезионной прочности композиционного материала

при увеличении количества отвердителя в составе композиционного материала. Коэффициент перед взаимодействием факторов отрицательный. Это означает, что с увеличением всех факторов в совокупности уменьшается адгезионная и увеличивается когезионная прочность композита при сдвиге.

Выводы

В результате проведенных исследований влияния компонентов композиционного материала с углеродными наполнителями (УНТ, графен и фуллерен) на его прочность при сдвиге были получены уравнения регрессии.

Их интерпретация показала, что на композиционный материал с наполнителем графен оказывает влияние только количество разбавителя, причем с увеличением его количества увеличивается адгезионная и уменьшается когезионная прочность. На композит с фуллереном в качестве наполнителя влияет только количество отвердителя, причем с увеличением его количества уменьшается адгезионная и увеличивается когезионная прочность. У композиционного материала с наполнителем УНТ уравнение регрессии имеет более сложный вид: все рассматриваемые компоненты в той или иной степени оказывают влияние на адгезионную прочность. Наибольшее влияние оказывает количество отвердителя, его увеличение приводит к увеличению адгезионной и уменьшению когезионной прочности. Взаимодействие всех факторов в совокупности ($x_1x_2x_3$) оказывает меньшее влияние, и увеличение количества всех компонентов композиционного материала в совокупности ведет к уменьшению адгезионной и увеличению когезионной прочности композиционного материала при сдвиге.

Таким образом, получены зависимости влияния компонентов композиционного материала на его адгезионную и когезионную прочность. Это открывает возможность создания материалов для заделки трещин с заданными свойствами, что повышает эффективность ремонта газопроводных труб.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ревазов А.М., Алекперова С.Т. Прогнозирование эксплуатационной надежности магистральных газопроводов на основе мониторинга факторов, влияющих на возникновение аварийных ситуаций // Газотранспортные системы: настоящее и будущее: матер. VI междунар. науч.-техн. конф. GTS-2015. М.: НИИ природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ, 2015. С. 26.

2. Лисин Ю.В. Исследования физико-химических свойств стали длительно эксплуатируемых трубопроводов, оценка ресурса безопасной работы // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2015. Вып. 4 (20). С. 18-28.

3. Колесников Д.А. Методика мониторинга пожаровзрывобезопасности линейной части магистральных газопроводов: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: 2020. 169 с.

4. Moskovkina V.N., Zagidulin R.V. The Statistic Analyze of Stress-Corrosion Cracks on the Main Gas Pipeline Section // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 459. Chapter 3. Article Number 042009. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042009.
5. Moskovkina V.N., Zagidulin R.V. The Study of Possibility of Stress-Corrosion Cracks Group Resolution by Eddy-Current Flaw Detector // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 459. Chapter 3. Article Number 042010. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042010.
6. Ряховских И.В., Мельникова А.В. Совершенствование требований к ремонту магистральных газопроводов с дефектами коррозионного растрескивания под напряжением // Газотранспортные системы: настоящее и будущее: матер. VI междунар. науч.-техн. конф. GTS-2015. М.: НИИ природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ, 2015. С. 167.
7. Егорова Н.А., Змиенко Д.С., Козин И.В. Зарубежные тенденции применения композитных материалов для ремонта трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Т. 7. Вып. 4. С. 44-53.
8. Романцов С.В. Разработка конструкций стеклопластиковых муфт и методов расчета их работоспособности при ремонте газопроводов: дис. ... канд. техн. наук. М.: 2006. 170 с.
9. Гречишников А., Воробьев И. Современные решения для ремонта трубопроводов // Инженерная практика. 2013. № 06, 07.
10. Тляшева Р.Р., Гафарова В.А., Вагазова К.Р., Кузев А.М. Композиционный материал для заполнения полости трещин и трещиноподобных дефектов // Башкирский химический журнал. 2016. Т. 23. № 3. С. 56-62.
11. Гафарова В.А. Применение композиционных материалов для сдерживания роста трещин в нефтегазовом оборудовании // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16. № 5. С. 99-107. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-5-99-107.
12. 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.
13. Богданова Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 68 с.
14. Кузеев И.Р., Наумкин Е.А. Роль поверхности в механизмах образования и разрушения структур в системе углеводород-вода // Нефтегазовое дело. 2003. № 1. С. 365-371.
15. Никитина Ю.Н., Зотова А.В., Ягафарова З.А. Структура и физические свойства фуллера — C60 // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2017. № Т2. С. 37-39. URL: <http://e-koncept.ru/2017/570009.htm>. (дата обращения: 22.09.2021).
16. Баимова Ю.А., Мулюков Р.Р. Графен, нанотрубки и другие углеродные наноструктуры. М.: РАН, 2018. 211 с.
17. Хуссейн Сафаа, Мохаммед Ридха Хуссейн, Наджари Хоссейна, Ханфар Адама Изучение оптических свойств углеродных нанотрубок и их современных приложений // Качество и жизнь. 2018. № 2 (18). С. 57-61.
18. Revazov A.M., Alekperova S.T. Prognostirovanie ekspluatatsionnoi nadezhnosti magistral'nykh gazoprovodov na osnove monitoringa faktorov, vliyayushchikh na vzniknovenie avariinykh situatsii [Forecasting the Operational Reliability of Main Gas Pipelines Based on Monitoring the Factors Affecting the Occurrence of Emergency Situations]. *Materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii GTS-2015 «Gazotransportnye sistemy: nastoyashchee i budushchee»* [Materials of the VI International Scientific and Technical Conference GTS-2015 «Gas Transportation Systems: Present and Future»]. Moscow, NII prirodnikh gazov i gazovykh tekhnologii — Gazprom VNIIGAZ Publ., 2015, pp. 26. [in Russian].
19. Lisin Yu.V. Issledovaniya fiziko-khimicheskikh svoystv stali dlitel'no ekspluatiruemykh truboprovodov, otsenka resursa bezopasnoi raboty [Research of Physical and Chemical Properties of Steel for Continuously Operated Pipelines and Assessment of Safe Operational Life]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefii i nefteproduktov — Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2015, Issue 4 (20), pp. 18-28. [in Russian].
20. Kolesnikov D.A. Metodika monitoringa pozharovzryvbezopasnosti lineinoi chasti magistral'nykh gazoprovodov: dis. kand. tekhn. nauk [Methods for Monitoring Fire and Explosion Safety of the Linear Part of Main Gas Pipelines: Cand. Engin. Sci. Diss.]. St. Petersburg, 2020. 169 p. [in Russian].
21. Moskovkina V.N., Zagidulin R.V. The Statistic Analyze of Stress-Corrosion Cracks on the Main Gas Pipeline Section. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, Vol. 459, Chapter 3, Article Number 042009. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042009.
22. Moskovkina V.N., Zagidulin R.V. The Study of Possibility of Stress-Corrosion Cracks Group Resolution by Eddy-Current Flaw Detector. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, Vol. 459, Chapter 3, Article Number 042010. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042010.
23. Ryakhovskikh I.V., Melnikova A.V. Sovershenstvovanie trebovaniy k remontu magistral'nykh gazoprovodov s defektami korrozionnogo rastreskivaniya pod napryazheniem [Improvement of the Requirements for the Repair of Main Gas Pipelines with Defects in Stress Corrosion Cracking]. *Materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii GTS-2015 «Gazotransportnye sistemy: nastoyashchee i budushchee»* [Materials of the VI International Scientific and Technical Conference GTS-2015 «Gas Transportation Systems: Present and Future»]. Moscow, NII prirodnikh gazov i gazovykh tekhnologii — Gazprom VNIIGAZ Publ., 2015, pp. 167. [in Russian].
24. Egorova N.A., Zmienko D.S., Kozin I.V. Zarubezhnye tendentsii primeneniya kompozitnykh materialov dlya remonta truboprovodov [Overseas Trends in Application of Composite Materials for Pipeline Repair]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefii i nefteproduktov — Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2017, Vol. 7, Issue 4, pp. 44-53. [in Russian].
25. Romantsov S.V. Razrabotka konstruktivnykh skhem stekloplastikovykh muft i metodov rascheta ikh rabotosposobnosti pri remonte gazoprovodov: dis. kand. tekhn. nauk [Development of Structures for Fiberglass Couplings and Methods for Calculating their Performance During the Repair of Gas Pipelines: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Moscow, 2006. 170 p. [in Russian].
26. Grechishnikov A., Vorobev I. Sovremennyye resheniya dlya remonta truboprovodov [Modern Solutions for Pipeline

REFERENCES

1. Revazov A.M., Alekperova S.T. Prognostirovanie ekspluatatsionnoi nadezhnosti magistral'nykh gazoprovodov

Repair]. *Inzhenernaya praktika — Engineering Practice*, 2013, No. 06, 07. [in Russian].

10. 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].

11. Gafarova V.A. Primenenie kompozitsionnykh materialov dlya sderzhivaniya rosta treshchin v neftegazovom oborudovanii [Application of Composite Materials for Fracture Growth Control in Oil and Gas Equipment]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 16, No. 5, pp. 99-107. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-5-99-107. [in Russian].

12. 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].

13. Bogdanova Yu.G. Adgeziya i ee rol' v obespechenii prochnosti polimernykh kompozitov [Adhesion and its Role in Ensuring the Strength of Polymer Composites]. Moscow, MGU im. M.V. Lomonosova Publ., 2010. 68 p. [in Russian].

14. Kuzeev I.R., Naumkin E.A. Rol' poverkhnosti v mekhanizмах obrazovaniya i razrusheniya struktur v sisteme uglevodorod-voda [The Role of the Surface in the Mechanisms of Formation and Destruction of Structures in the Hydrocarbon-Water System]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2003, No. 1, pp. 365-371. [in Russian].

15. Nikitina Yu.N., Zotova A.V., Yagafarova Z.A. Struktura i fizicheskie svoystva fullerena — C60 [Structure and Physical Properties of Fullerene — C60]. *Nauchno-metodicheskii elektronnyi zhurnal «Koncept» — Scientific-Methodological Electronic Journal «Koncept»*, 2017, No. T2, pp. 37-39. Available at: <http://e-koncept.ru/2017/570009.htm>. (accessed 22.09.2021). [in Russian].

16. Baimova Yu.A., Mulyukov R.R. Grafen, nanotrubki i drugie uglerodnye nanostruktury [Graphene, Nanotubes and other Carbon Nanostructures]. Moscow, RAN Publ., 2018. 211 p. [in Russian].

17. Khussein Safaa, Mokhammed Ridkha Khussein, Nadzhari Khosseina, Khanfar Adama Izuchenie opticheskikh svoystv uglerodnykh nanotrubok i ikh sovremennykh prilozhenii [Study of Optical Properties of Carbon Nanotubes and Their Modern Applications]. *Kachestvo i zhizn' — Quality and Life*, 2018, No. 2 (18), pp. 57-61. [in Russian].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ильина Влада Николаевна, аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, Уфа, Россия

Vlada N. Ilyina, Post-Graduate Student of Process Machinery and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russia
moskovkina.vlada@mail.ru

Гафарова Виктория Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, Уфа, Россия

Victoria A. Gafarova, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russia
gafarova.vika@bk.ru

Бугай Дмитрий Ефимович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материаловедение и защита от коррозии», УГНТУ, Уфа, Россия

Dmitry E. Bugai, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Materials and Corrosion Protection Department, USPTU, Ufa, Russia
debugai@mail.ru

Ильин Степан Викторович, ассистент кафедры «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, инженер-конструктор ООО НПФ «Пакер», Уфа, Россия

Stepan V. Ilyin, Assistant of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Engineer-Constructor, SPF «Paker» LLC, Ufa, Russia
stephan91@mail.ru

Кузеев Искандер Рустемович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», УГНТУ, Уфа, Россия

Iskander R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Technological Machines and Equipment Department, USPTU, Ufa, Russia
kuzeev2002@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.08.2021; одобрена после рецензирования 22.09.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 12.08.2021; approved after reviewing 22.09.2021; accepted for publication 01.11.2021.