

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВРЕМЕННОГО РЕМОНТА ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДАХ

Рассмотрены составы композиционных материалов на основе эпоксидных смол с различными типами наполнения. Показано, что материал с металлическим наполнителем имеет более высокие механические характеристики по сравнению с материалом, наполненным керамикой. При этом высокие механические свойства материал сохраняет при низких температурах и после взаимодействия с нефтепродуктами. Гидравлические испытания показали, что материал с керамическим наполнителем выдержал только на не сквозных дефектах. Материал с металлическим наполнителем выдержал испытания на не сквозных дефектах и на сквозных дефектах при давлении до 4,0 МПа. Рассмотренный материал с наполнителем на основе порошка Fe и Cr может быть использован в трубопроводном строительстве для временного ремонта арматуры при не сквозных дефектах или при сквозных дефектах задвижек, работающих до 1,6 МПа.

Ключевые слова: трубопроводная арматура, временный ремонт, композиционный материал, механические свойства, гидравлические испытания.

Введение. Запорная арматура, применяемая в нефтегазовой отрасли, подвергается влиянию различных негативных факторов. Это может привести к появлению коррозионного разрушения или к образованию трещин и других дефектов. Агрессивность как циркулирующих жидкостей, так и грунта, в котором проложены магистральные трубопроводы, являются важными факторами, влияющими на их эксплуатационные характеристики. Коррозионные процессы (внешнее, внутреннее, водородное растрескивание или коррозионное растрескивание под напряжением), контролируемые этими факторами, представляют опасность с высокой вероятностью возникновения и большим потенциалом прогрессирующей деградации и разрушения труб и арматуры в процессе их эксплуатации [1, 2]. Традиционно для ремонта нефте- и газопроводной арматуры применялась технология сварки, но транспортировка такого узла к месту ремонта требует крупной тяжелой техники и усложняет задачу. С другой стороны, композитная технология ремонта идеально подходит для ремонта на месте из-за простоты обращения и небольшого пространства, необходимого для выполнения работ. Следовательно, многие отрасли, особенно нефтяная и нефтегазовая, заинтересованы в композитной системе ремонта поврежденных узлов трубопроводной арматуры. Упомянутые дефекты эффективно обнаруживать на более ранних стадиях их зарождения и роста, после чего можно проводить ремонт путем заполнения образовавшихся полостей композици-

онным материалом [3, 4]. Композиционные материалы на полимерной основе обладают высокими физико-механическими и химическими свойствами. Их использование приводит к снижению трудоемкости ремонта трубопроводов и трубопроводной арматуры. Технология ремонта не требует сложного оборудования и высокого уровня подготовки рабочих. Применение композиционных материалов позволяет исключить сварку, наплавку или пайку. Кроме того, можно выполнять ремонт изделий и узлов, которые невозможно восстановить другими методами. Отсутствуют операции разборки узлов и агрегатов, сложные технологические процессы последующей обработки [5].

Композитные системы ремонта трубопроводной арматуры классифицируют следующим образом: предварительно отвержденные слоистые, гибкие мокрые укладки, предварительно пропитанные, разъемные композитные муфты и гибкие ленточные системы.

В последние годы исследователями России и других стран проводятся работы по созданию композиционных материалов на основе эпоксидных смол для ремонта и восстановления геометрии конструкции трубопроводной арматуры [6, 7]. Для повышения пластических свойств композиционные материалы подвергают армированию стекловолокном, а также другими материалами. Используются углепластики, углеродные волокна, бор и др. Для достижения определенных свойств используют комбинации из волокнистых материалов и нано-

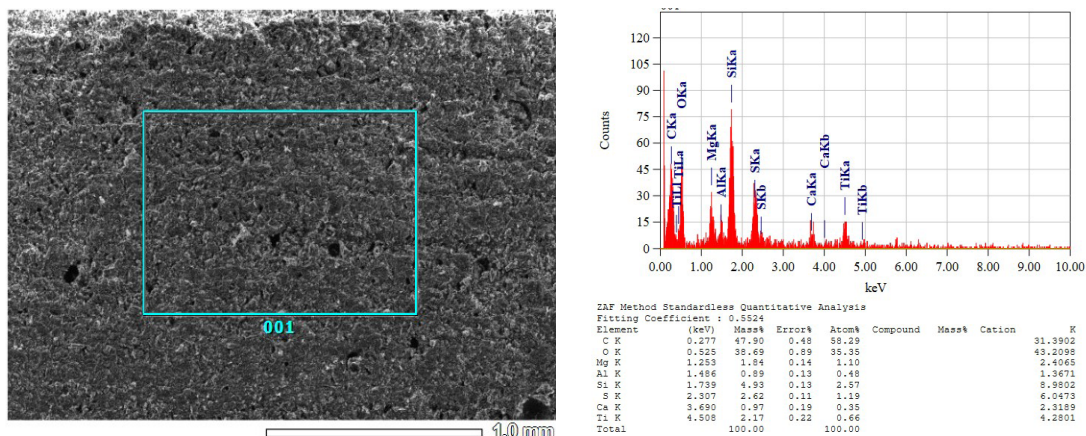


Рис. 1. Структура и состав образца 1

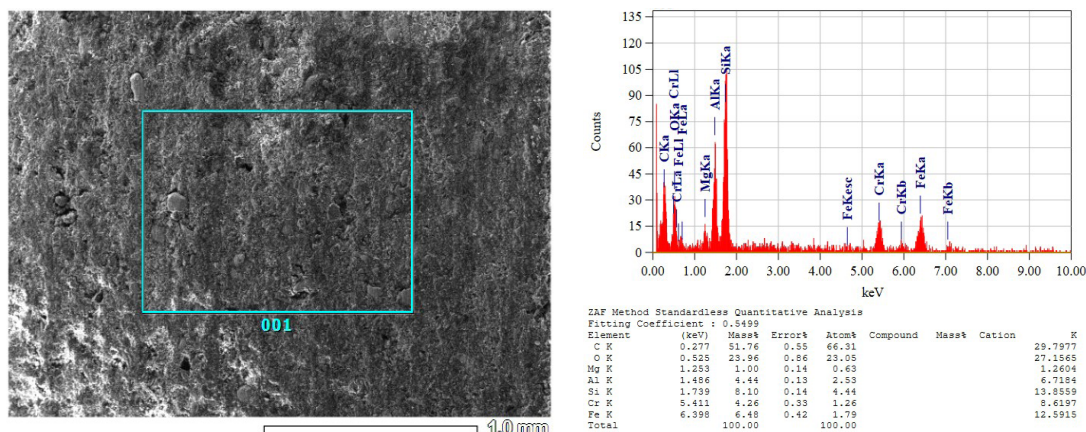


Рис. 2. Структура и состав образца 2

материалов. Например, применяют наночастицы кремния [8]. Гибридные композитные системы часто используются для достижения баланса между прочностью и стоимостью композитной системы при правильном выборе натуральных или синтетических волокон или их комбинации. В дополнение к вышеупомянутым преимуществам гибридные композитные системы могут устранить гальваническую коррозию между углеродным волокном и стальным металлом путем введения между ними еще одного слоя композита, армированного волокном (кроме углеродного волокна).

Выбор матрицы для композита основывается на желаемых механических и физических свойствах, которые должны соответствовать области применения. Температура отверждения, усадка и температура стеклования смолы являются наиболее важными параметрами, поскольку ремонт происходит на месте, где условия окружающей среды могут отличаться от требуемых благоприятных условий (внутризаводских) для процесса ремонта. Правильная адгезия поверхности раздела между волокном (углерод/стекло) и матрицей, а также между композитным ламинатом и сталью, очень важна, что обеспечивает лучшую производительность системы композитного ремонта металлических трубопроводов. Создание различных композиционных материалов на основе эпоксидных смол с твердыми наполнителями позволяет применять их в качестве агента, который в межремонтный период заполняет полость трещины или другого дефекта.

Для глубокого проникновения в полость трещины такие материалы должны обладать высокой текучестью, а также прочностью после образования твердой матрицы. Однако применяемые в настоящее время композиционные материалы, армированные стекловолокном, имеют пастообразную консистенцию и не могут заполнить полость трещины. При обработке глубоких трещин с малыми значениями ширины это становится ещё более затруднительно. Для создания композиционных материалов используют самые различные наполнители в зависимости от условий их использования. Например, в работах [9, 10] были созданы ремонтные компаунды, содержащие наночастицы углерода, металлов и керамики, которые рекомендованы для различных отраслей машиностроения.

Целью данной работы является изучение свойств материалов для ремонта трубопроводной арматуры. В этих материалах на основе эпоксидных смол в качестве наполнителя используются дисперсные металлические и керамические порошковые системы.

Объекты и методы исследований. К основным свойствам композитного материала, которые следует учитывать перед применением при ремонте трубопроводной арматуры, относятся предел прочности при растяжении, модуль упругости в продольном и поперечном направлениях и температура стеклования. Следовательно, выбор армирующего волокна, смолы и материала наполнителя должен основываться на механических характеристиках, стоимости и условиях воздействия. В работе ис-

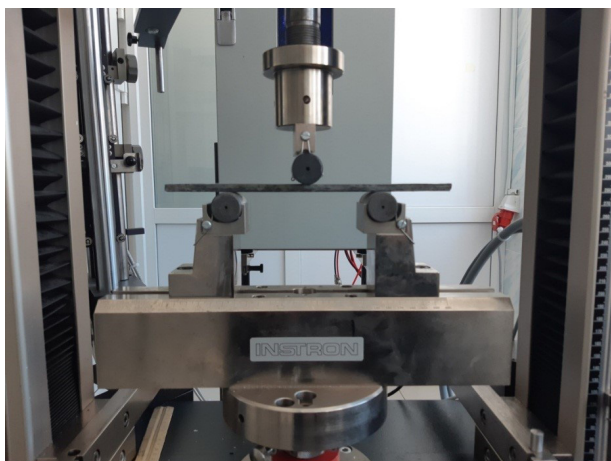


Рис. 3. Оснастка для испытаний на изгиб

следовались двухкомпонентные композиционные материалы на основе эпоксидной смолы с быстрым отверждением. Образец 1 — с керамическим наполнителем, содержащий до 10 % талька ($Mg_3H_2(SiO_3)_4$) (рис. 1). Образец 2 — с металлическим порошком, содержащим Fe и Cr (рис. 2). Для сравнения исследуемых образцов с известными композиционными материалами был выбран материал на основе клея Loctite компании «Henkel» с наполнителем из стеклоткани (образец 3).

Считается, что материал должен иметь более высокую твердость для эффективной передачи сосредоточенного напряжения композитному ремонтному слою. Поэтому одной из оценок эффективности применения материала являлась его твердость после стеклования. Твердость определяли методом Shore D с использованием прибора Shore D Durometr.

Образцы для испытания были изготовлены в форме пластины с параллельными плоскостями. Толщина каждого образца составляла не менее 4 мм. Каждый образец проходил испытания через 3 и через 12 часов после нанесения покрытия.

Для определения предела прочности композиционных материалов на растяжение образцы изготавливали в виде пластины с размерами $18 \times 170 \times 6$ мм и испытывали на разрывной машине Zwick/Roell Z010. Испытания проводились при температуре (23 ± 2) °C и скорости движения активного захвата 50 мм/мин.

Для определения предела прочности композиционных материалов на изгиб использовалась та же разрывная машина, но со специализированной оснасткой. Общий вид нагружения образцов представлен на рис. 3.

Для исследования адгезионной прочности сцепления со стальной поверхностью использовались нестандартные образцы с диаметрами соединяемых поверхностей 44 мм.

Испытания проводились на разрывной машине Instron 8080 в три этапа. На первом этапе исследовали образцы при нормальной температуре (23 °C). Затем образцы охлаждали до -60 °C с помощью жидкого азота и разрывали. На третьем этапе исследовалась адгезионная прочность при нормальной температуре после воздействия на композиты светлых нефтепродуктов в течении 24 ч.

Результаты экспериментов и обсуждение.

На первом этапе исследований определяли механические свойства композиционных материалов: твердость, прочность на растяжение и изгиб, а так-

Таблица 1

Результаты исследований твердости по Shore D

№ образца	Среднее значение через 3 часа после заливки	Среднее значение через 12 часов после заливки
1	66	69
2	73	80
3	—	76

Таблица 2

Результаты испытаний образцов на растяжение

№ образца	σ_{B1} , МПа	ε_{B1} , %
1	17,74	5,38
2	19,68	8,05
3	145,92	—

Таблица 3

Значения модуля упругости при испытании на изгиб

№ образца	E_f , МПа	
	по образцам	среднее значение
1	117	138,2 (20044 psi)
	95,6	
	202	
	129	
	147	
2	433	341 (49457 psi)
	249	
	339	
	382	
	302	
3	378	313 (45396 psi)
	317	
	245	
	408	
	220	

же адгезионную прочность сцепления со сталью. Результаты испытаний твердости через 3 часа после заливки и через 12 часов после заливки приведены в табл. 1.

Анализ результатов показывает, что через три часа после заливки твердость образцов номер 1 и 2 почти достигла своего максимального значения. В то же время образец номер 3 после трех часов выдержки еще находился в полутвердом состоянии. Через двенадцать часов после заливки композиционного материала наибольшую твердость приобрел образец номер 2.

В табл. 2 приведены результаты исследований образцов на растяжение, при этом для каждого образца взято среднеарифметическое значение всех проведенных испытаний.



Рис. 4. Образцы, установленные в разрывную машину для испытаний, охлажденные до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 4

Результаты испытаний на адгезионную прочность

№ образца	При нормальной температуре	При $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$	После выдержки в дизельном топливе
1	9,5	9,3	9,0
2	7,75	14,65	10,1
3	30,4	19,85	29,8

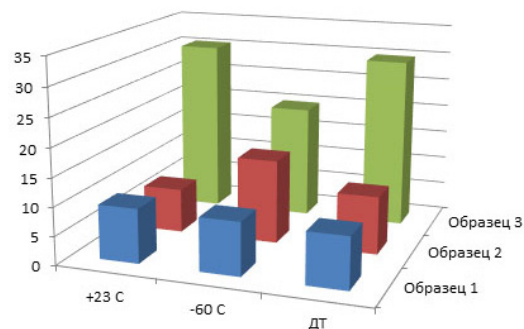


Рис. 5. Результаты исследований адгезионной прочности

Из таблицы видно, что предел прочности на растяжение у образца номер 3 в несколько раз выше, чем у образцов номер 1 и 2. Это объясняется армированием композиционного материала образца номер 3 стекловолокном в несколько слоев в перекрестном направлении, в то время как образцы номер 1 и 2 армированы порошковыми материалами.

Результаты испытаний на изгиб приведены в табл. 3.

Из представленных результатов видно, что наибольшее значение показал образец 2.

Для исследований адгезионной прочности склеенные образцы выдерживались при нормальной температуре до испытания не менее 12 часов. Для испытаний при отрицательной температуре образцы погружались в жидкий азот и выдерживались до достижения температуры ниже $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем устанавливались в разрывную машину (рис. 4). Для исследования влияния нефтепродуктов на адгезионную прочность материалов образцы выдерживались в дизельном топливе более 12 часов. За результат исследований приняты среднеарифметические значения испытаний для каждого из образцов.

Сводные результаты по исследованию адгезионной прочности представлены в табл. 4 и на рис. 5.

Исследования показали, что у образца № 3, имеющего при обычной температуре самые высокие прочностные показатели, при низких температурах они падают. В то же время у образца № 2 адгезионная прочность при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ даже повышается.

Следующим этапом исследований стали производственные испытания. Для имитации поврежденной арматуры была использована задвижка DN500 PN75 (80). На корпусе запорной арматуры отрезным кругом с помощью углошлифовальной машины наносились «дефекты» длиной 120...150 мм по наружной поверхности и шириной 1,8...2,5 мм. Та-

кие надрезы выполнялись сквозные и не сквозные (40–50 % от толщины стенки) (рис. 6). Сквозные дефекты имели протяженность на внутренней поверхности 20...30 мм.

Перед нанесением композиционного материала предварительно проводилась зачистка поверхности до металлического блеска, обезжиривание и подогрев поверхностей до температуры $40\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Время сушки после нанесения до начала испытаний составляло 24 часа. Внешний вид нанесенных покрытий приведен на рис. 7.

При ремонте дефектов глубиной 40–50 % от толщины стенки все исследуемые образцы композиционных материалов выдержали циклические нагружения с максимальным избыточным давлением.

На применение при ремонте сквозных дефектов исследуемые композиционные материалы показали следующие результаты. Разгерметизация трещины, отремонтированной образцом номер 1, произошла при постепенном повышении максимального избыточного давления до 2,0 МПа. В то же время образцы номера 2 и 3 такое испытание выдержали без разрушений. Испытание циклическим внутренним давлением от минимального значения $P = 0,16\text{ МПа}$ до максимального $P = 1,6\text{ МПа}$ образцы номера 2 и 3 также выдержали, однако при постепенном повышении давления до максимального ($P = 4,0\text{ МПа}$) разрушились и они (рис. 8).

Выводы и заключение. Таким образом, исследование показало, что композиционный материал с добавлением металлического наполнителя на основе Fe и Cг показывает более высокие механические характеристики по сравнению с материалом, наполненным керамикой. Применение рассматриваемых в данном исследовании ремонтных конструкций на основе композитных материалов возможно для временного ремонта не сквозных дефектов запор-

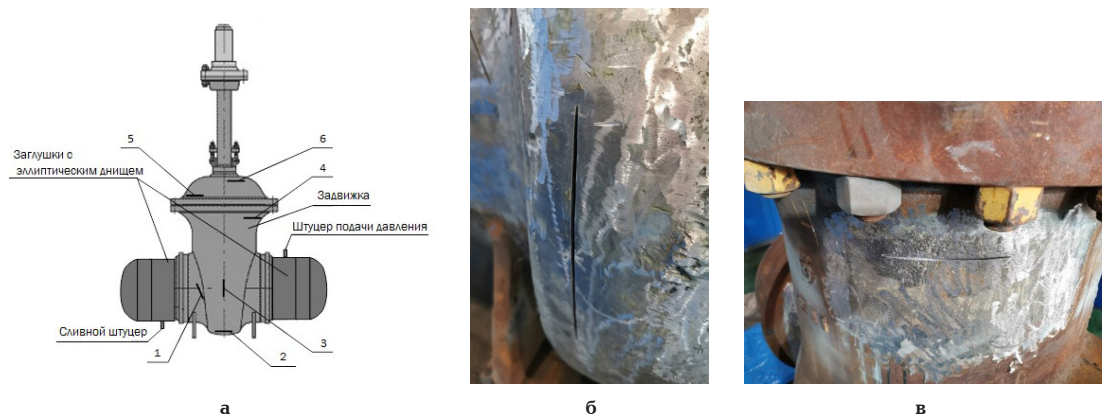


Рис. 6. Схема нанесения дефектов (а) и их внешний вид (б — сквозной, в — не сквозной)

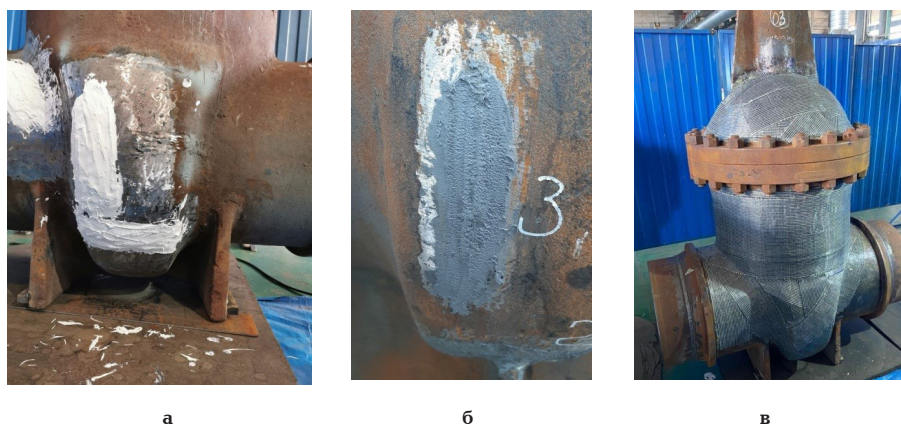


Рис. 7. Нанесение композиционного материала на дефекты (а — образец 1; б — образец 2; в — образец 3)



Рис. 8. Разгерметизация ремонтных участков на образцах 2 (а) и 3 (б)

ной арматуры глубиной до 40–50 % от толщины стенки или сквозных дефектов на запорной арматуре с рабочим давлением не более 1,6 МПа.

Такое ограничение связано с недостаточным проникновением составов в полость трещины с небольшой степенью раскрытия. Поэтому повышение текучести ремонтного состава будет дальнейшим направлением исследований.

Библиографический список

1. Зайнуллин Р. С., Морозов Е. М., Александров А. А. Критерии безопасного разрушения элементов трубопровод-

ных систем с трещинами. Москва: Наука, 2005. 316 с. ISBN 5-02-033637-8.

2. Ерехинский Б. А., Маслаков С. В., Шустов Н. И. [и др.] Растрескивание металла корпусов задвижек фонтанной арматуры газодобывающих скважин северных месторождений // Территория нефтегаз. 2014. № 2. С. 31–36.

3. Иванов В. А., Тулинов А. Б. Прогрессивные методы ремонта с использованием износостойких полимерных композиционных материалов // Ключевые тренды в композитах. Наука и технологии: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Москва: ООО «Диона», 2019. С. 292–303.

4. Макаренко О. А., Кравцов В. В. Применение адгезивов для восстановления оборудования и трубопроводов нефтега-

зовой отрасли. Проблемы и решения. Санкт-Петербург: ООО «Недра», 2006. 296 с. ISBN 5-94089-097-0.

5. Dumitrescu A., Minescu M., Dinita A. [et al.]. Corrosion repair of pipelines using modern composite materials systems: A numerical performance evaluation // *Energies*. 2021. Vol. 14 (3). 615. DOI: 10.3390/en14030615.

6. Гафарова В. А., Кравцов В. В., Кузеев И. Р. Анализ способов и обзор композиционных материалов для заделки трещин в конструкциях // *Актуальные проблемы науки и техники: материалы 8-ой Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых (18–20 ноября 2014 г.): в 2-х т.* Уфа: РИЦ УГНТУ, 2014. Т. 2. С. 104–106.

7. Нелюб В. А., Бородулин А. С. Реокинетические свойства эпоксидных связующих, предназначенных для изготовления и ремонта труб из стеклопластиков // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2017. № 10. С. 28–35.

8. Sprenger S. Fiber-reinforced composites based on epoxy resins modified with elastomers and surface-modified silica nanoparticles // *Journal of Materials Science*. 2014. Vol. 49, issue 6. P. 2391–2402. DOI: 10.1007/s10853-013-7963-8.

9. Manjunatha M., Taylor A. C., Kinloch A. J. [et al.]. The tensile fatigue behaviour of a silica nanoparticle-modified glass fibre reinforced epoxy composite // *Composites Science and Technology*. 2010. Vol. 70. P. 193–199.

10. Новиков Е. В., Лахно А. В., Шаманов Р. С. Влияние структуры на прочностные характеристики композиционных

материалов и изделий машиностроения // *Международный технико-экономический журнал*. 2018. № 5. С. 66–71.

ФИЛИППОВ Юрий Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код 4766-1795

AuthorID (РИНЦ) 175491

ORCID 0000-0002-0458-0298

AuthorID (SCOPUS) 7006252515

Адрес для переписки: weld_techn@mail.ru

Для цитирования

Филиппов Ю. О. Исследование применения композиционного материала для временного ремонта запорной арматуры на магистральных нефтепроводах // *Омский научный вестник*. 2022. № 3 (183). С. 42–47. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-42-47.

Статья поступила в редакцию 07.04.2022 г.

© Ю. О. Филиппов