

Научная статья

УДК 691.175.2

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-228-237>

CC BY 4.0

Влияние нанокремниевых наполнителей на свойства композиционных материалов

Влада Николаевна Ильина* , Степан Викторович Ильин , Виктория Александровна Гафарова ,
Искандер Рустемович Кузеев 

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: moskovkina.vlada@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Наиболее перспективным в настоящее время является метод ремонта, заключающийся в использовании композиционных материалов для заделки трещин и трещиноподобных дефектов. Для этого композит должен обладать высокой текучестью в жидком состоянии, достаточной для заполнения полости дефекта, адгезией к стали, необходимой для скрепления берегов трещины, и пластичностью, которая позволит ему компенсировать деформационные сдвиги при циклическом и статическом нагружении конструкции. **Методы и материалы.** Изучались композиционные материалы с нанокремниевыми наполнителями, в качестве которых использовали фуллерены, нанотрубки и графен. Решение поставленных задач осуществлялось при помощи стандартных и самостоятельно разработанных методик, методов статистической обработки данных и применения современных программных комплексов. **Результаты и их обсуждение.** Композиционный материал с фуллереном в качестве наполнителя демонстрирует стабильно высокую текучесть по сравнению с другими исследованными композитами. Это позволяет рекомендовать его для заделки трещин с небольшой шириной раскрытия. Композит с наполнителем УНТ сохраняет жидкотекучесть на одном уровне в среднем около 35 минут. Он может быть использован в качестве ремонтного материала в том случае, когда расположение дефекта не позволяет провести его заделку в короткий промежуток времени. **Заключение.** Проведенные исследования позволяют решить прямую и обратную задачу: а) изучение свойств композиционного материала и проектирование его структуры дают возможность определить, подходит ли он для заделки конкретной геометрии трещины; б) для обнаруженной трещины с определенной конфигурацией полости можно осуществить подбор оптимальных свойств композита, изменяя его состав.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: заделка трещин, композиционный материал, фуллерен, углеродные нанотрубки, графен.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ильина В.Н., Ильин С.В., Гафарова В.А., Кузеев И.Р. Влияние нанокремниевых наполнителей на свойства композиционных материалов // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 3. С. 228–237. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-228-237>. – EDN: DMAVTS.

ВВЕДЕНИЕ

Многолетний опыт изучения конструкций показывает, что многие дефекты, такие как: включения различного происхождения, скопления дислокаций и вакансий, микротрещины – возникают еще на стадии изготовления. В процессе эксплуатации в окрестностях таких дефектов из-за высокой концентрации напряжений происходит зарождение новых или рост уже имеющихся трещин, что приводит к локальному или полному разрушению объекта.

Наиболее перспективным в настоящее время является метод ремонта, заключающийся в использовании композиционных материалов для заделки трещин и трещиноподобных дефектов. При введении

в полость такого дефекта жидкого композиционного материала формирование его структуры происходит в ограниченном объеме; композит взаимодействует с берегами трещины по адгезионному механизму, что ограничивает возможность дальнейшего раскрытия дефекта [2]. Результаты численного моделирования процесса заделки трещины композитом показывают, что скрепление берегов приводит к снижению напряжений в ее вершине, вследствие чего удается предотвратить образование области возможной сингулярности их значений [3–6].

Основными сферами применения наполненных эпоксидных композитов являются авиационная и космическая техника [7–9], приборо- и машиностроение [10, 11, 29, 31], строительная индустрия

© Ильина В.Н., Ильин С.В., Гафарова В.А., Кузеев И.Р., 2023

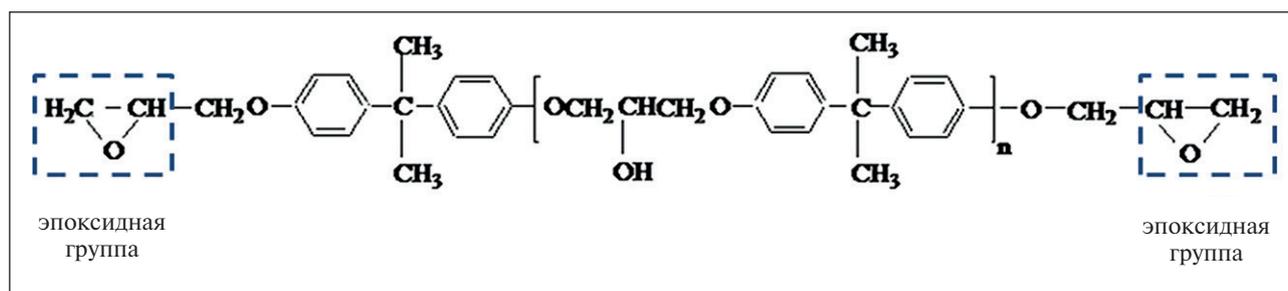


Рис. 1. Структурная формула ЭД-20

[12–15], а также нефтегазовая отрасль [1, 30, 32–39]. Для заделки трещин композиционный материал должен обладать высокой текучестью в жидком состоянии, достаточной для заполнения полости дефекта, адгезией к стали, необходимой для скрепления берегов трещины, и пластичностью, которая позволит ему компенсировать деформационные сдвиги при циклическом и статическом нагружении конструкции.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Матрица в композиционном материале должна обеспечивать целостность материала, а также распределение внутренних напряжений. В данной работе в качестве полимерной матрицы использовалась эпоксидно-диановая смола ЭД-20, структурная формула которой представлена на рис. 1.

Для отверждения эпоксидной смолы применялся полиэтиленполиамин (ПЭПА), структурная формула которого приведена на рис. 2. Использование ПЭПА позволяет проводить процесс полимеризации при температуре окружающей среды 20–25°C.

В данной работе изучались композиционные материалы с нанокремнеземными наполнителями, в качестве которых использовали фуллерены, нанотрубки и графен.

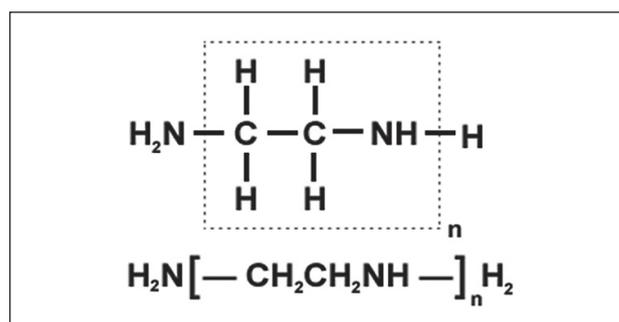


Рис. 2. Структурная формула ПЭПА

Углеродные нанотрубки (УНТ) являются одномерными структурами, так как их длина в несколько раз превосходит диаметр. Они представляют собой свернутые листы графена, которые образуют полые молекулы цилиндрической формы, атомы углерода в которых находятся в состоянии sp^2 -гибридизации, удельная площадь поверхности составляет около 500–1000 m^2/g [16]. Типичная структура УНТ приведена на рис. 3б.

Графен является двумерной аллотропной формой углерода. Он представляет собой плоскую ароматическую молекулу с развитой и доступной с двух сторон поверхностью (площадь свободной поверхности доходит до 2630 m^2/g), атомы углерода находятся в со-

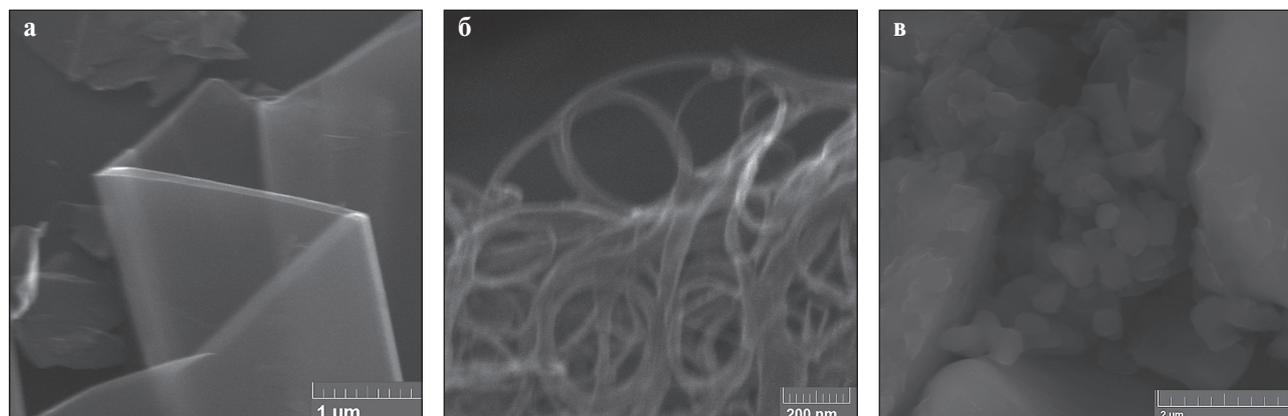


Рис. 3. Типичная структура углеродных наполнителей: а – графен, б – УНТ, в – фуллерены

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

стоянии sp^2 -гибридизации [16]. Типичная структура графена приведена на рис. 3а.

Фуллерены относятся к трехмерным наполнителям, так как являются молекулярной формой углерода с замкнутым объемом и поверхностью большой кривизны, удельная площадь поверхности составляет около $1340 \text{ м}^2/\text{г}$ [40]. Они представляют собой многоатомные молекулы в виде объединенных пяти- и шестиугольников с общими ребрами, атомы углерода при этом находятся в состоянии sp^2 -гибридизации. Типичная структура фуллерена приведена на рис. 3в.

В качестве разбавителя использовалась магнитная жидкость на основе керосина, которая содержит магнитные частицы Fe_2O_3 размером от 5 до 30 нм. В работе [1] авторы применяли магнитную жидкость для снижения сопротивления движению при течении в узких каналах, что позволило увеличить проникающую способность рассматриваемого композиционного материала.

Структурообразование эпоксидных смол при их отверждении сопровождается нагревом смеси. Для выявления закономерностей влияния компонентов композиционного материала на характер протекания экзотермической реакции в процессе полимеризации композитов осуществлялась фиксация тепловых эффектов методом тепловизионной съемки с помощью Тепловизора Ti55 IR Flexcam.

Исследование текучести композитов заключалось в измерении скорости перемещения одной капли композиционного материала по наклонной пластине за определенный промежуток времени.

Методика исследования смачиваемости поверхности металла композиционным материалом заключалась в следующем: на металлическую пластину наносилось по одной капле композита, сразу же после этого проводилась фотосъемка капель, далее полученные снимки обрабатывались в программном комплексе Компас-3D для определения угла смачивания.

Для проверки влияния шероховатости поверхности металла на адгезионную прочность при сцеплении композиционного материала со сталью использовались нестандартные образцы, которые представляют собой две ответные детали: полость на одной из деталей, в которую заливался композит, и цилиндрический стержень – на другой (рис. 4). Планируемая область применения композиционного материала – заполнение реальных трещин, в связи с этим диапазон для исследования был выбран путем измерения шероховатости поверхности пророщенной на образце трещины (рис. 5). Шероховатость контролировалась профилометром TR200. Разрушение соединения деталей осуществлялось на разрывной машине Instron 8801.

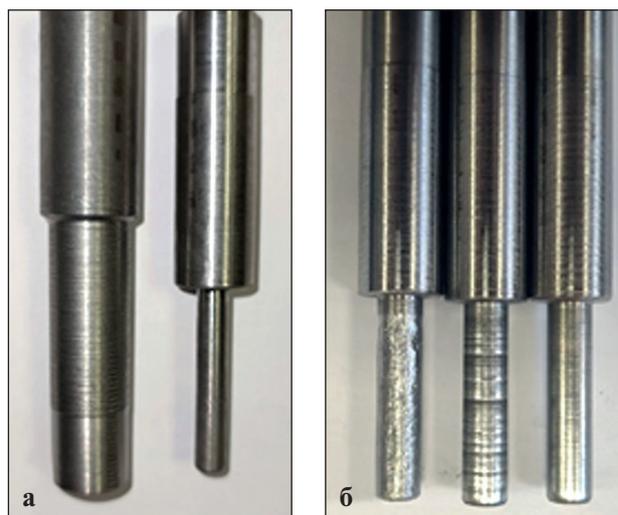


Рис. 4. Нестандартные образцы для исследования влияния шероховатости поверхности металла на адгезионную прочность при взаимодействии композиционного материала со сталью: а – внешний вид образцов; б – образцы с разной шероховатостью стержней

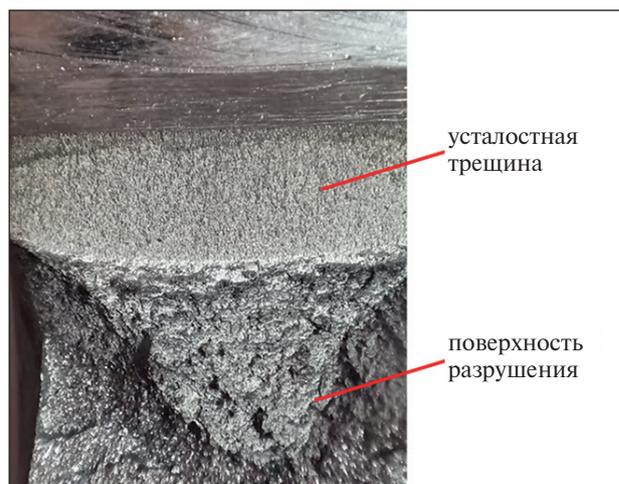


Рис. 5. Поверхность образца с пророщенной трещиной, шероховатость которой измерялась профилометром TR200

Определение усадки композиционных материалов в процессе полимеризации осуществлялось путем заполнения ячеек металлической формы исследуемым составом и измерения расстояния от верхней грани ячейки до отвержденного композита с помощью штангенциркуля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе отверждения эпоксидной смолы при взаимодействии эпоксидных и аминных групп про-

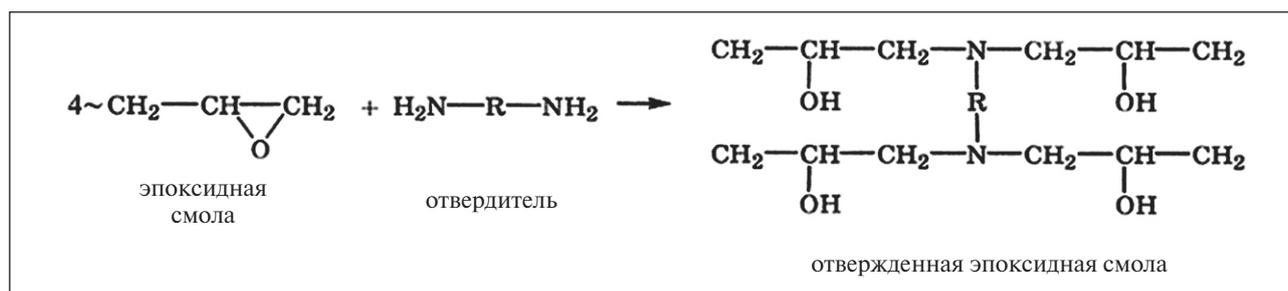


Рис. 6. Реакция отверждения эпоксидной смолы при использовании отвердителя ПЭПА

исходят химические и термодинамические процессы с образованием пространственно-сшитой сетки (рис. 6). Переход жидкого олигомера в твердое агрегатное состояние происходит в несколько этапов. Сначала образуются разветвленные макромолекулы, далее они взаимодействуют друг с другом, формируя узлы сетки, смесь при этом становится более вязкой. Далее материал полностью теряет текучесть [18].

Изучение взаимодействия компонентов композиционного материала с помощью снятия термограмм в работе Гафаровой В.А [1] показало перспективность применения данного метода для изучения характера распределения дисперсной фазы в композиции. Исходя из этого была поставлена серия экспериментов для выявления закономерностей влияния компонентов композита на характер протекания экзотермической реакции в процессе его полимеризации.

Существует несколько гипотез влияния наноразмерных наполнителей на отверждение композиционных материалов.

Авторы [19] утверждают, что при введении наполнителей в эпоксидную основу может изменяться стехиометрическое соотношение вблизи поверхности раздела матрицы и наполнителя. При отверждении могут создаваться дополнительные связи смолы с наполнителем либо может изменяться структура формирующейся матрицы, что повлияет на полноту отверждения и ее механические свойства.

Показано [41–47], что высокая модифицирующая способность нанонаполнителей определяется значительной удельной площадью поверхности. В связи с тем, что поверхностная энергия наночастиц высока, для них типична адсорбция различных макромолекул [16]. Авторы [15, 20, 9] предполагают, что, если между эпоксидной основой и наполнителем происходит адсорбционное взаимодействие, это может привести к снижению подвижности макромолекул и, соответственно, к их реакционной способности.

Также автором [9] выдвинуто предположение, что благодаря высокой адсорбционной способности наночастицы способны становиться центрами химической сшивки в полимерах.

Для проверки вышеизложенных гипотез было проведено исследование влияния углеродных наноразмерных наполнителей на процесс отверждения композиционного материала.

Соотношения компонентов в композитах были выбраны исходя из проведенных ранее полных факторных экспериментов [17], в результате которых определены оптимальные составы для обеспечения баланса адгезионной и когезионной прочности композиционных материалов.

Кривые изменения температуры композитов в процессе их полимеризации представлены на рис. 7. Характер изменения температуры в процессе полимеризации можно разделить на два этапа: на первом этапе происходит увеличение температуры смеси до достижения максимального значения, на втором этапе происходит ее охлаждение.

На всех графиках кривые полимеризации разработанных композиционных материалов (смеси 2, 5 и 3) находятся выше кривых, соответствующих смесям эпоксидной смолы, отвердителя и наполнителя (смеси 8, 9 и 10). Это может быть связано с тем, что углеродные наноматериалы (фуллерен, графен и УНТ), обладающие большой поверхностной энергией, проявляют повышенную склонность к слипанию и образованию агломератов, размер которых может достигать сотен микрометров. В результате увеличения размера агломератов их адсорбционная способность уменьшается в связи с уменьшением удельной поверхности. Как следствие количество макромолекул олигомера, которые входят в состав гранично-фазовых структур, сокращается. При добавлении разбавителя происходит снижение вязкости смеси, что приводит к разбиению агломератов и равномерному распределению частиц в композите.

Для того чтобы композиционный материал мог заполнить полость трещины, он должен обладать высокой текучестью. Было проведено исследование изменения текучести композитов от времени, прошедшего от начала процесса полимеризации. Результаты приведены на рис. 8.

Текучесть композиционного материала с наполнителем УНТ сохраняется на одном уровне в течение

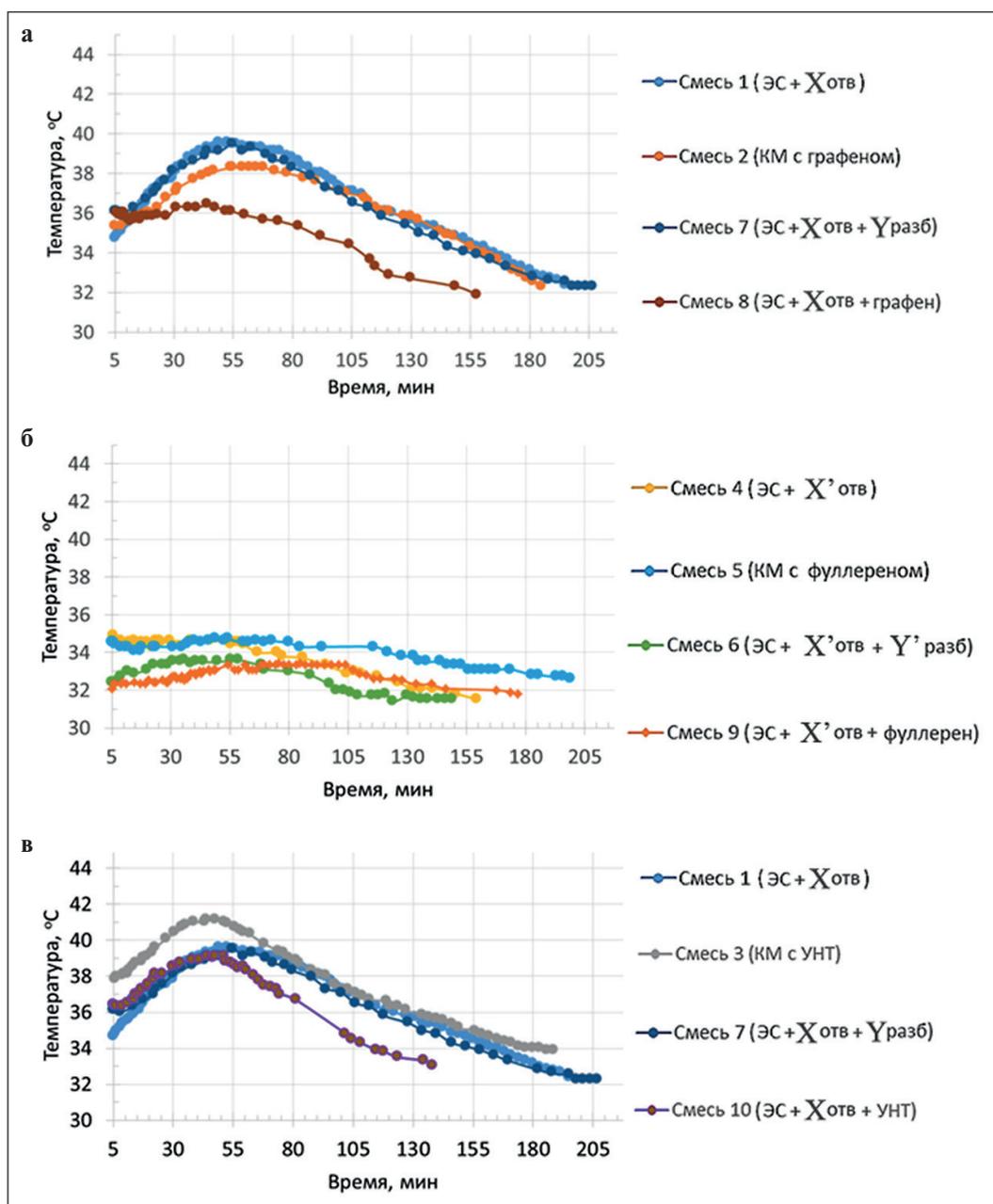


Рис. 7. Кривые изменения температуры композитов с углеродными наполнителями: графеном (а), фуллеренами (б), УНТ (в): X, X' – количество отвердителя в смеси; Y, Y' – количество разбавителя в смеси

35 минут, после чего происходит ее резкое снижение (рис. 8). Это можно связать с тем, что температура композиционного материала с УНТ в начальный момент времени значительно выше, чем у других исследуемых композитов, также в течение 39 минут происходит саморазогрев смеси, что предотвращает снижение текучести данного композита (рис. 9). Данное свойство позволяет рекомендовать в качестве ремонтного материала композит с наполнителем УНТ в том случае, когда расположение дефекта не позволяет провести его заделку в короткий промежуток

времени. Композиционный материал с наполнителем фуллерен демонстрирует стабильно высокую текучесть по сравнению с другими исследуемыми композитами (рис. 8), поэтому он рекомендуется для заделки трещин с небольшим расхождением берегов.

Растекание композиционного материала по поверхности металла является одним из факторов, влияющих на адгезионную прочность соединения адгезив-субстрат [23]. На рис. 10 приведено несколько вариантов смачивания жидкостью поверхностей с разной шероховатостью.

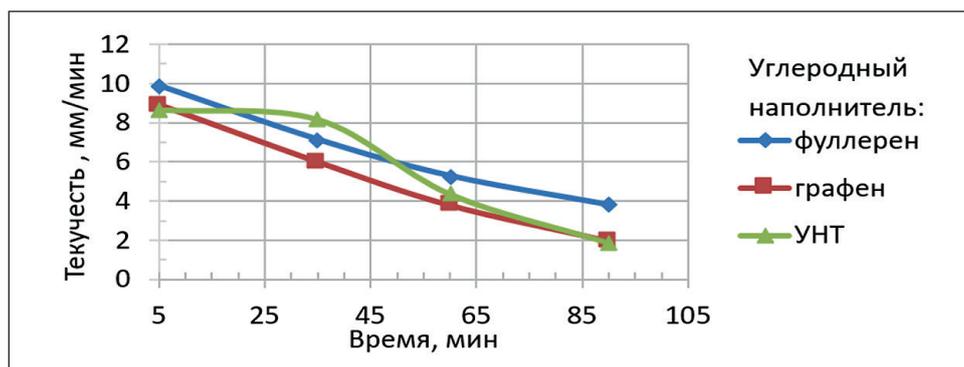


Рис. 8. Зависимости текучести КМ от времени, прошедшего с начала процесса полимеризации

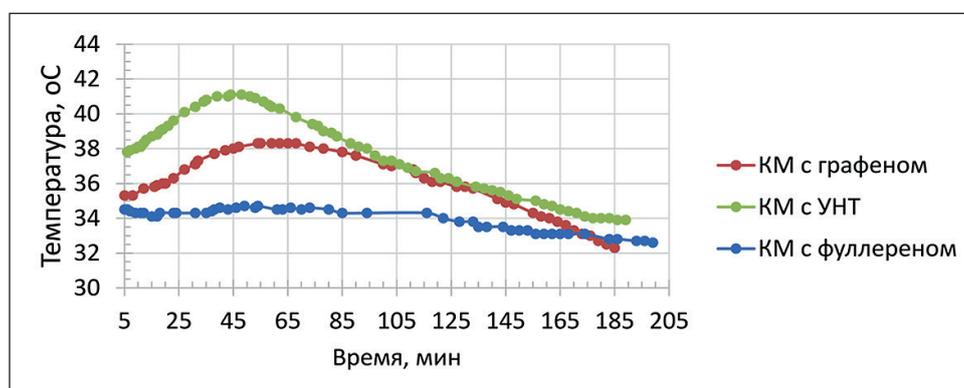


Рис. 9. Зависимости изменения температуры КМ с тремя видами углеродных наноразмерных наполнителей

В случае если жидкость хорошо смачивает поверхность с высокой шероховатостью, площадь фактического контакта увеличивается по сравнению с гладкой поверхностью, как это показано на рис. 10а и 10б.

При плохом смачивании поверхности с высокой шероховатостью, наоборот, площадь фактического контакта уменьшается по сравнению с гладкой поверхностью (рис. 10в и 10г).

Таким образом, смачивание композиционным материалом поверхности стенок трещины играет ключевую роль в степени ее заполнения: при уменьшении угла смачивания степень заполнения трещины увеличивается [28].

Было проведено исследование смачиваемости поверхности металла композитом, результаты приведены в табл. 1.

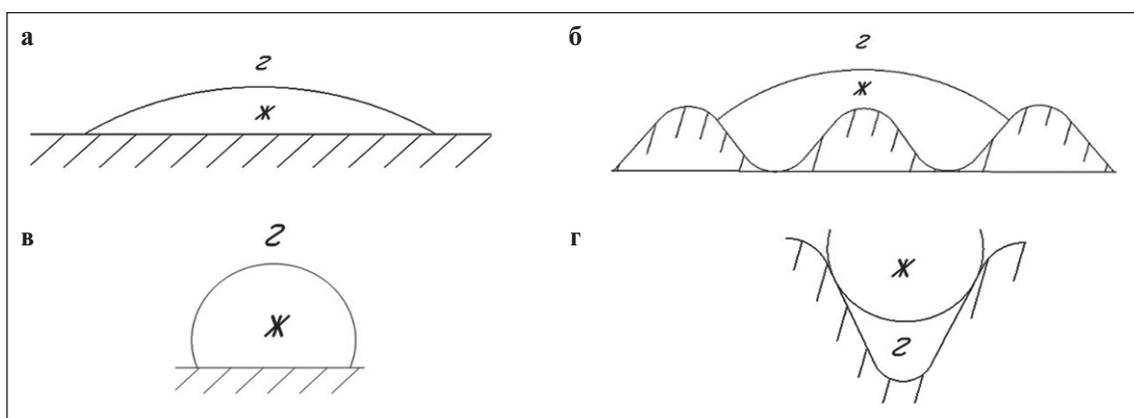


Рис. 10. Смачивание жидкостью поверхностей с разной шероховатостью: гладкая поверхность, смачивание хорошее (а); шероховатая поверхность, смачивание хорошее (б); гладкая поверхность, смачивание плохое (в); шероховатая поверхность, смачивание плохое (г) [23]

Таблица 1

Углы смачивания композитом поверхности металла

Угол смачивания, °	Наполнитель		
	УНТ	Графен	Фуллерен
№ 1	55	55	56
№ 2	53	55	55
№ 3	50	53	53
среднее значение	53	54	55

Все рассмотренные композиционные материалы хорошо смачивают поверхность металла, так как угол смачивания лежит в диапазоне $0^\circ < \theta < 90^\circ$.

Существует гипотеза [23, 24], согласно которой при повышении шероховатости поверхности адгезионная прочность сцепления жидкости и металла будет также расти за счет увеличения площади фактического контакта. Для проверки этой гипотезы была поставлена серия экспериментов. В результате исследования построены зависимости адгезионной прочности соединения композиционного материала с металлом от шероховатости поверхности металла. Результаты представлены на рис. 11.

Как видно из рис. 11, у всех рассматриваемых составов композиционных материалов происходит увеличение адгезионной прочности соединения композита с металлом при повышении шероховатости поверхности. Это подтверждается и тем, что при шероховатости в области $Ra = 12$ мкм композиты со всеми видами наполнителей разрушаются когезионно.

В процессе отверждения композиционных материалов происходит выделение некоторого количества летучих компонентов, что приводит к усадке. Под действием усадочных напряжений в слое

полимерных материалов возникают необратимые деформации, в результате которых образуются остаточные напряжения. Они оказывают существенное влияние на свойства композитов, так как являются причиной снижения их прочности за счет появления трещин и дефектов [25, 9, 15]. Результаты измерения усадки КМ в процессе полимеризации приведены в табл. 2.

Все рассмотренные материалы показали практически полное отсутствие усадки, что говорит о незначительных остаточных напряжениях, возникающих при полимеризации композитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют решить прямую и обратную задачу: а) изучение свойств композиционного материала и проектирование его структуры дают возможность определить, подходит ли он для заделки конкретной геометрии трещины; б) для обнаруженной трещины с определенной конфигурацией полости можно осуществить подбор оптимальных свойств композита, изменяя его состав.

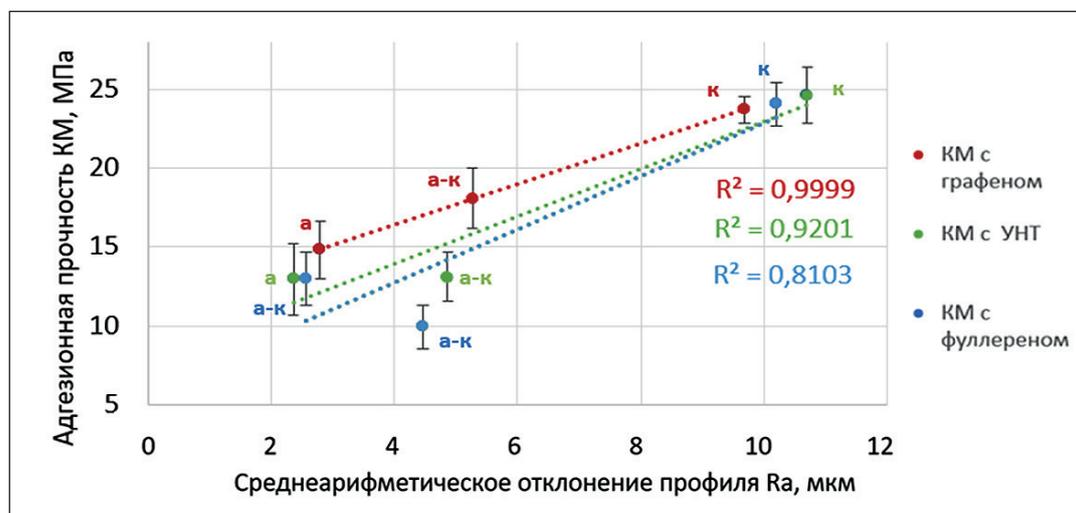


Рис. 11. Зависимость адгезионной прочности соединения КМ с металлом от шероховатости поверхности металла

Таблица 2

Результаты измерения усадки КМ в процессе полимеризации

Вид углеродного наполнителя	Усадка, мм			
	Эксперимент № 1	Эксперимент № 2	Эксперимент № 3	Среднее значение
Графен	0,05	0	0,05	0,03
УНТ	0,02	0,01	0,02	0,02
Фуллерен	0,01	0	0	0

Анализ полученных результатов показывает, что композиционный материал с фуллереном в качестве наполнителя демонстрирует стабильно высокую текучесть по сравнению с другими исследованными композитами. Это позволяет рекомендовать его для заделки трещин с небольшой шириной раскрытия.

Композит с наполнителем УНТ сохраняет жидкотекучесть на одном уровне в среднем около 35 минут. Он может быть использован в качестве ремонтного материала в том случае, когда расположение дефекта не позволяет провести его заделку в короткий промежуток времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гафарова В.А. Материалы и способ заделки трещин в нефтегазовом оборудовании в межремонтный период эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09. Уфа, 2019. 132 с.
2. Гафарова В.А. Криони Н.К., Мингажев А.Д. Восстановительный ремонт магистрального трубопровода в процессе его эксплуатации // Пром-Инжиниринг: материалы III Международной научно-технической конференции. Челябинск. 2017. С. 121–125.
3. Влияние композиционного материала на распределение напряжений в области трещины / В.А. Гафарова, А.Ю. Бабин, Ю.В. Базрова, А.М. Кузеев // Современные технологии композиционных материалов. 2019. С. 295–296.
4. Gafarova, V.A., Babin A.Yu., Gareeva E.R., Abdrakhmanova K.N., Lomakina L.N. Influence of a filler on strength characteristics of the properties of a composite material based on epoxy resin. *Materials Today: Proceedings*. 2019;11:252–257.
5. Моделирование заполнения трещины композитным материалом в программном комплексе Abagus / К.Н. Абдрахманова, А.Ю. Бабин, Э.Р. Гареева, В.А. Гафарова // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов: материалы Международной научно-практической конференции. Уфа. 2018. С. 135–140.
6. Гафарова В.А., Невзоров В.Н. Моделирование процесса проникновения композиционного материала в полость трещины // Сварка и контроль: материалы научно-практической конференции. Уфа. 2016. С. 85–86.
7. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами / С.В. Кондрашов, К.А. Шашкеев, Г.Н. Петрова, И.В. Мекалина // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 405–419. – <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419>
8. Исследование влияния технологических режимов изготовления эпоксинаноккомпозитов с углеродными нанотрубками на их теплостойкость / А.Г. Загора, С.В. Кондрашов, Н.В. Антюфеева, А.А. Пыхтин // Труды ВИАМ. 2019. № 1(73). С. 64–73. – <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-1-64-73>
9. Пыхтин А.А. Высокотехнологичные эпоксидные нанодисперсии и нанокомпозиты с регулируемой структурой и комплексом свойств: дисс. ... канд. техн. наук.: 05.17.06. Москва, 2017. 125 с.
10. Иванов В.А. Методы восстановления технологического и вспомогательного оборудования износостойкими композиционными материалами: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Москва, 2015. 195 с.
11. Брусенцева Т.А., Филиппов А.А., Фомин В.М. Композиционные материалы на основе эпоксидной смолы и наночастиц // Известия Алтайского государственного университета. 2014. № 1-1(81). С. 25–27. – [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2014\)1.1-04](https://doi.org/10.14258/izvasu(2014)1.1-04)
12. Чеботарева Е.Г. Наномодифицированные композиты строительного назначения с использованием эпоксидной смолы: автореф. на соиск. ученой степени канд. техн. наук: 05.23.05. Белгород, 2010. 19 с.
13. Новоселова С.Н. Разработка и исследование свойств низковязких полимерных композитов функционального назначения: автореф. на соиск. ученой степени канд. техн. наук: 05.17.06. Бийск, 2012. 16 с.

14. Горбунов Ф.К., Шевцов Ю.Н., Бердникова Л.К. Термодинамические характеристики материалов, заменяемых для ремонта дорожного и аэродромного покрытий // Дороги и мосты. 2017. № 2(38). С. 317–327.
15. Свойства композиционных полимерных материалов на основе эпоксидной смолы, модифицированных нитридом бора / С.Н. Горбачева, И.Ю. Горбунова, М.Л. Кербер, С.В. Антонов // Успехи в химии и химической технологии. 2017. № 11(192). С. 35–36.
16. Иржак В.И. Структура и свойства полимерных материалов : учеб. пособие. Санкт-Петербург : Лань, 2019. 168 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/123663> (дата обращения: 22.11.2022).
17. Адгезионная и когезионная прочность композиционного материала с углеродными наполнителями для заделки трещин / В.Н. Ильина, В.А. Гафарова, Д.Е. Бугай, С.В. Ильин, И.Р. Кузеев // Нефтегазовое дело. 2021. № 19(6). С. 124–133. – <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-124-133>
18. Чэнь Я., Мараховский П.С., Мальшева Г.В. Определение теплофизических свойств эпоксидных материалов в процессе их отверждения // Труды ВИАМ. 2018. № 9(69). С. 119-123. – <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-119-123>
19. Введение нанопорошков и механические свойства материалов на основе эпоксидных смол / Т. Брусенцева, К. Зобов, А. Филиппов [и др.] // Наноиндустрия. 2013. № 3(41). С. 24–31.
20. Мостовой А.С. Разработка составов, технологии и определение свойств микро- и нанонаполненных эпоксидных композитов функционального назначения: автореф. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. 05.17.06. Саратов, 2014. 20 с.
21. Самойлова Д.О. Исследование условий введения углеродных нанотрубок в полимер-углеродный композит с целью повышения прочности. Челябинск: ЮУрГУ, 2018. 138 с. – URI: <http://dspace.susu.ru/handle/0001.74/23510> (дата обращения: 22.11.2022).
22. Мараховский П.С., Кондрашов С.В., Акатенков Р.В. О модификации теплостойких эпоксидных связующих углеродными нанотрубками // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2015. № 2(101). С. 118–127.
23. Тополянский П.А. Исследование адгезионных свойств и механизма образования покрытия, наносимого методом финишного плазменного упрочнения. Ч. 2 // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 7-й Международной практической конференции-выставки Санкт-Петербург. 2005. С. 316–333.
24. Зимон А. Д. Адгезия пленок и покрытий. Москва: Химия, 1977. 352 с.
25. Зорин В.А., Баурова Н.И. Применение интеллектуальных материалов при производстве, диагностировании и ремонте машин. Изд. 2-е, переработ. и доп. М. : ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2015. 110 с.
26. Огнев А.Ю., Теплых А.М., Батаев В.А. Полимерный композиционный материал на основе эпоксидной смолы, упрочненный многослойными углеродными нанотрубками // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2009. № 4(37). С. 115–122.
27. Хвостов С.А. Принципы модификации углеродными наночастицами эпоксидных связующих и технология получения композитов на их основе: автореф. на соиск. ученой степени канд. техн. наук: 05.02.01. Барнаул, 2007. 19 с.
28. Ghanem A, Lang Y. Introduction to polymer adhesion. *ResearchGate: Network Journal*. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/319098070_Introduction_to_polymer_adhesion (accessed: 03.24.2023).
29. Панин С.В., Корниенко Л.А., Алексенко В.О. Влияние углеродных нановолокон/нанотрубок на формирование физико-механических и триботехнических характеристик полимерных композитов на основе термопластичных матриц СВМПЭ и ПЭЭК // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2017. № 60(9). С. 45-51. – <https://doi.org/10.6060/tcct.2017609.7y>
30. Крутиков И.Ю. Восстановление работоспособности деталей технических устройств с трещиноподобными дефектами композитными материалами: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Уфа, 2010. 124 с.
31. Гвоздев А.А. Пути совершенствования технологии ремонта деталей и соединений составами ХМС – холодная молекулярная сварка // Владимирский земледелец. 2014. № 4(70). С. 39–40.
32. Способ ремонта дефектов в защитных покрытиях: пат. 2157306 Рос. Федерация № 99116373/02 / Кравцов В.В., Кузеев И.Р., Шингаркина О.В. ; заявл. 28.07.1999 ; опубл. 10.10.2000, Бюл. № 28. 6 с.
33. Сунгатуллин И.Р. Повышение защищенности опасных производственных объектов при эксплуатации критических элементов с трещинами: дисс. ... канд. техн. наук: 05.26.03. Уфа, 2022. 114 с.
34. Гафарова В.А. Применение композиционных материалов для сдерживания роста трещин в нефтегазовом оборудовании // Нефтегазовое дело. 2018. № 16(5). С. 99–107. – <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2018-5-99-107>
35. Гафарова В.А. Углерод в конденсированных углеводородных фазах, сталях и чугунах // Нанотехнологии в строительстве. 2017. № 9(6). С. 111–128. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-6-111-128>
36. Способ восстановительного ремонта трубопровода и устройство для его осуществления: пат. 2601782 Рос. Федерация 2015122333/06 / Кузеев И.Р., Гафарова В.А., Мингажев А.Д.; заявл. 10.11.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31. 11 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

37. Композиционный материал для заполнения полости трещин и трещиноподобных дефектов / Р.Р. Тляшева, В.А. Гафарова, К.Р. Вагазова, А.М. Кузеев // Башкирский химический журнал. 2016. № 23(3). С. 56–62.
38. Гафарова В.А., Вагазова К.Р. Характер взаимодействия композиционного материала с поверхностью стали с различным уровнем шероховатости // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. 2015. № 5. С. 56–59.
39. 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 VII Международной научно-практической конференции молодых ученых. Уфа. 2014. С. 104–106.
40. Березкин В.И., Викторовский И.В., Вуль А.Я. Фуллереновые микрокристаллы как адсорбенты органических соединений // Физика и техника полупроводников. 2003. № 37(7). С. 802–810.
41. Смирнов И.В. Моделирование физико-механических свойств и климатической стойкости эпоксидных композитов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Саранск, 2017. 252 с.
42. Перспективные технологии получения функциональных материалов конструкционного назначения на основе нанокompозитов с УНТ (обзор) / С.В. Кондрашов, К.А. Шашкеев, О.В. Попков, Л.В. Соловьянчик // Труды ВИАМ. 2016. № 3(39). С. 7. – <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-3-7-7>
43. Елецкий А.В. Сорбционные свойства углеродных наноструктур // Успехи физических наук. 2004. № 174(11). С. 1191–1231.
44. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2013. 111 с.
45. Структурообразование защитных полимерных покрытий / А.Д. Корнеев, П.В. Борков, А.А. Клышников, И.В. Папин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2011. № 22(41). С. 69–72.
46. Danchenko Yu., Andronov V., Teslenko M., Permiakov V., Rybka E., Meleshchenko R., Kosse A. Study of the free surface energy of epoxy composites using an automated measurement system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018;12:9–17.
47. Лизунов Д.А. Разработка высокопрочных углепластиков на основе эпоксисодержащих олигомеров: дисс. ... канд. техн. наук: 05.17.06. Москва, 2014. 243 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ильина Влада Николаевна – аспирант, преподаватель кафедры «Технологические машины и оборудование», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, moskovkina.vlada@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7010-4937>

Ильин Степан Викторович – аспирант, преподаватель кафедры «Технологические машины и оборудование», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, stephan91@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6840-8344>

Гафарова Виктория Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, gafarova.vika@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9793-2394>

Кузеев Искандер Рустемович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, kuzeev2002@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3569-1086>

ВКЛАД АВТОРОВ

Ильина В.Н. – литературный обзор; проведение экспериментальной части исследования; обработка результатов; графическое и табличное представление результатов.

Ильин С.В. – проведение экспериментальной части исследования; анализ результатов исследований.

Гафарова В.А. – научное консультирование; участие составлении плана экспериментальных работ.

Кузеев И.Р. – научное руководство, концепция исследований, составление плана экспериментальных работ, выводы статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 02.05.2023; принята к публикации 05.05.2023.