

Исследование влияния наноуглеродных наполнителей на морфологию эпоксидного связующего

Влада Николаевна Ильина^{1*} , Степан Викторович Ильин¹ , Гульнара Рашитовна Халикова^{1,2} ,
Виктория Александровна Гафарова¹ , Искандер Рустемович Кузеев¹ 

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

² Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

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

АННОТАЦИЯ: Введение. При разработке композиционного материала важно понимать, как компоненты, входящие в его состав, влияют на свойства. Наполнители, взаимодействуя с матрицей, могут изменять ее исходную структуру, за счет чего композит приобретает отличные от матрицы характеристики, что дает возможность создавать композиционные материалы с заданными физико-механическими свойствами. Высокая модифицирующая способность нанонаполнителей определяется значительной удельной площадью поверхности. Это дает возможность при относительно небольшой концентрации частиц перекрывать суммарную площадь границ раздела между матрицей и дисперсной фазой даже при использовании небольшого количества наполнителя. **Методы и материалы.** Изучались композиционные материалы с наноуглеродными наполнителями, в качестве которых использовали фуллерены, нанотрубки и графен. Для оценки структуры композитов выбрано фрактографическое исследование изломов образцов на растяжение, которое позволяет определить характер разрушения и способность композита сдерживать рост трещин. Микроструктура композиционных материалов, а также морфология упрочняющих наноуглеродных наполнителей исследовались на растровом электронном микроскопе Tescan MIRA3. **Результаты и обсуждение.** В композите с графеном энергия трещины рассеивается за счет ветвления и удлинения пути ее развития. Углеродные нанотрубки, закрепившись в стенах трещины, препятствуют раскрытию ее берегов. Энергия трещины также расходуется на преодоление сил трения при вытягивании УНТ из эпоксидной матрицы. Агломераты фуллеренов являются эффективными местами задержки фронта трещины, вынуждая его огибать себя, в результате чего образуются новые площади поверхностей разрушения. При этом происходит увеличение длины фронта и рост энергии, необходимой для разрушения материала. **Заключение.** Добавление наноуглеродных наполнителей (графена, УНТ и фуллеренов) как армирующих компонентов в эпоксидное связующее способствует изменению его структуры. Установлены вероятные механизмы упрочнения композиционных материалов при добавлении в них наноуглеродных наполнителей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композиционный материал, фуллерен, углеродные нанотрубки, графен, фрактографический анализ изломов, растровый электронный микроскоп.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ильина В.Н., Ильин С.В., Халикова Г.Р., Гафарова В.А., Кузеев И.Р. Исследование влияния наноуглеродных наполнителей на морфологию эпоксидного связующего // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 4. С. 328–336. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-328-336>. – EDN: KDJDUV.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день полимерные композиционные материалы нашли широкое применение во многих сферах: авиационной и космической технике [7–9], приборо- и машиностроении [10, 11, 33, 34], строительной индустрии [12–15], в том числе в нефтегазовой отрасли, где они применяются в качестве ремонтных материалов и защитных покрытий поверхностей от коррозионного воздействия [1–6, 28–32].

Область применения композитов напрямую влияет на требования, предъявляемые к физико-механическим свойствам этих материалов. При разработке композиционного материала важно понимать, как компоненты, входящие в его состав, влияют на свойства. Наполнители, взаимодействуя с матрицей, могут изменять ее исходную структуру, за счет чего композит приобретает отличные от матрицы характеристики, что дает возможность создавать композиционные материалы с заданными физико-механическими свойствами.

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

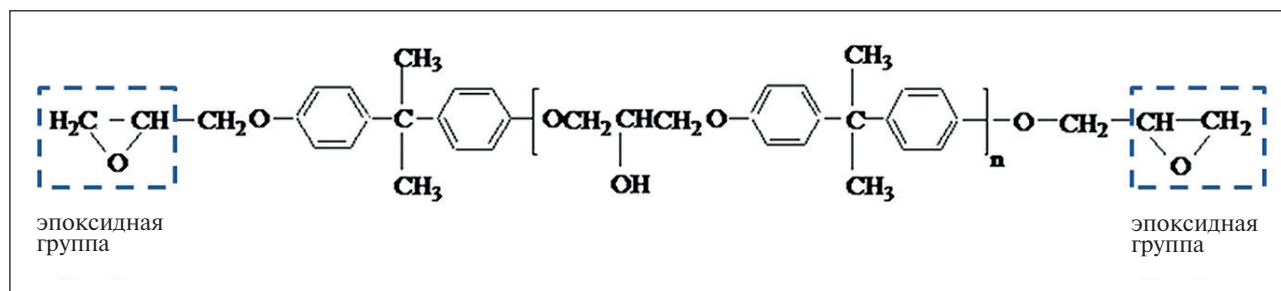


Рис. 1. Структурная формула ЭД-20

Высокая модифицирующая способность нанонаполнителей, в отличие от макро- и микроразмерных, определяется значительной удельной площадью поверхности [8, 9, 37–43]. Это дает возможность при относительно небольшой концентрации частиц перекрывать суммарную площадь границ раздела между матрицей и дисперсной фазой, а также позволяет эффективно воздействовать на физико-механические свойства композитов даже при использовании небольшого количества наполнителя.

Целью данной работы было исследование влияния наполнителей на морфологию эпоксидного связующего и способность композита сдерживать рост трещин.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве полимерной матрицы использовалась эпоксидно-диановая смола ЭД-20, структурная формула которой представлена на рис. 1. Эпоксидная смола представляет собой олигомер, на концах цепи молекулы которого располагаются эпоксидные группы.

В качестве отвердителя использовался полиэтиленполиамин (ПЭПА), структурная формула которого приведена на рис. 2. В процессе отверждения

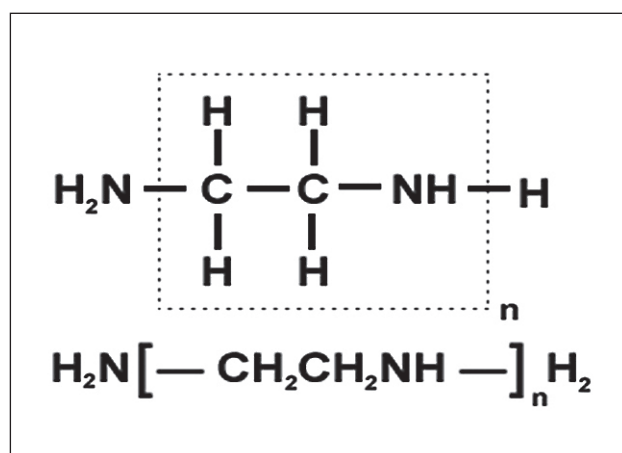


Рис. 2. Структурная формула ПЭПА

в результате химической реакции с аминогруппами отвердителя происходит раскрытие эпоксидных групп с образованием сшитых полимеров сетчатого строения.

В качестве армирующих наполнителей выбраны нанокремниевые материалы: фуллерены, нанотрубки и графен. Их выбор обусловлен различной морфологией структур.

Углеродные нанотрубки (УНТ) являются одномерными структурами. Они представляют собой свернутые листы графена, которые образуют полые молекулы цилиндрической формы, их удельная площадь поверхности составляет около 500 – 1000 м²/г [16]. Типичная структура УНТ приведена на рис. 3а и 3б.

Графен является двумерной аллотропной формой углерода. Его удельная площадь поверхности доходит до 2630 м²/г [16]. Типичная структура графена приведена на рис. 3в и 3г.

Фуллерены относят к трехмерным наполнителям, так как они представляют собой многоатомные молекулы с замкнутым объемом и поверхностью большой кривизны, их удельная площадь поверхности составляет около 1340 м²/г [35]. Типичная структура фуллеренов приведена на рис. 3д и 3е.

В качестве разбавителя применялась жидкость на основе керосина, содержащая магнитные частицы Fe₂O₃ размером от 5 до 30 нм, выбор которой обусловлен ее способностью снижать сопротивление движению композиционного материала в узких каналах [1, 36]. Для предотвращения образования крупных агломератов магнитных частиц в состав жидкости входило поверхностно-активное вещество (ПАВ) – стеариновая кислота C₁₇H₃₅COOH, которая образует вокруг частиц Fe₂O₃ молекулярный слой толщиной около 2 нм за счет 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 (рис. 4).

Соотношения компонентов в композиционных материалах были выбраны исходя из проведенных ранее авторами данной работы полных факторных

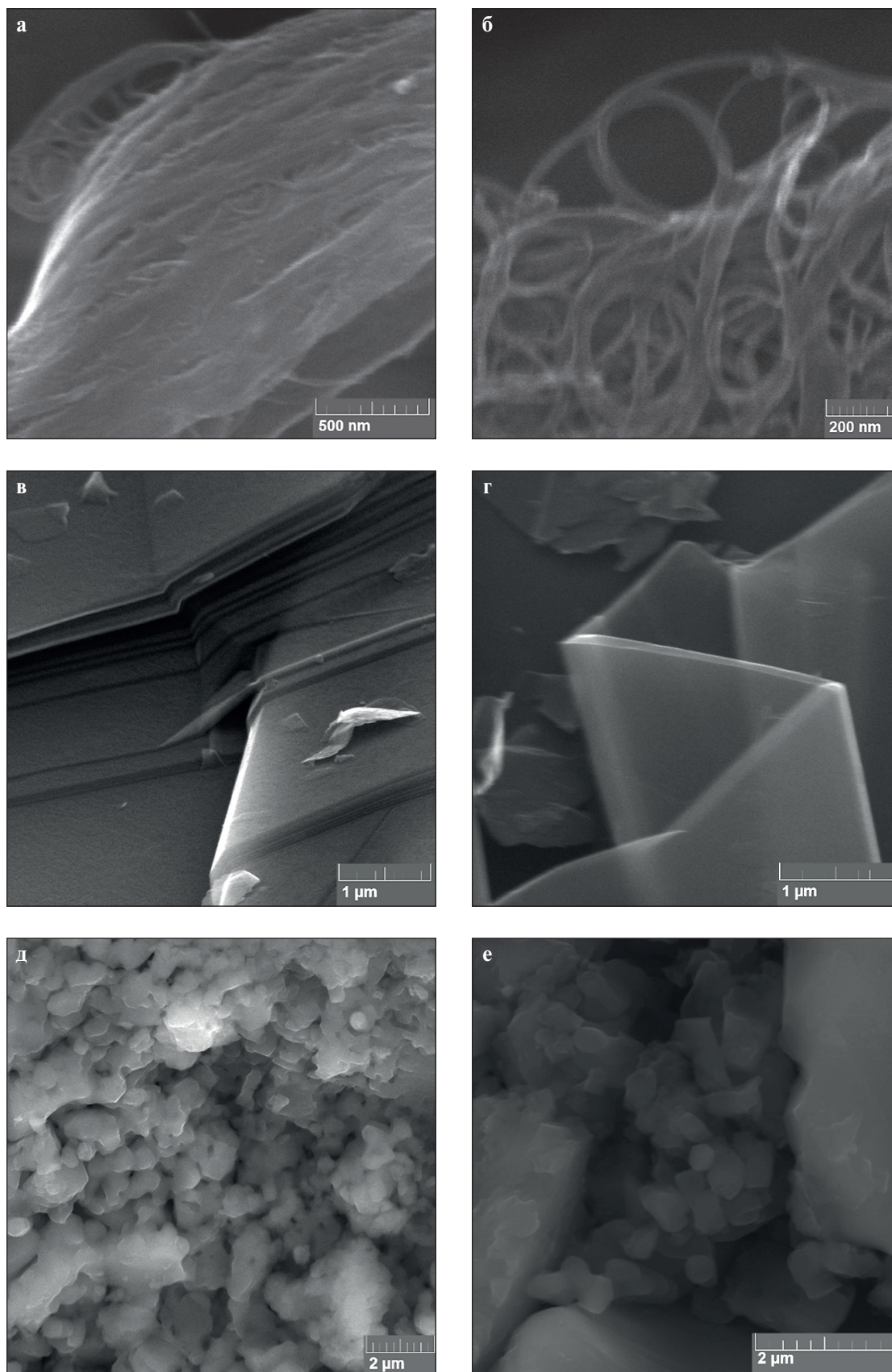


Рис. 3. Типичная структура углеродных наполнителей: а, б – УНТ; в, г – графен; д, е – фуллерены

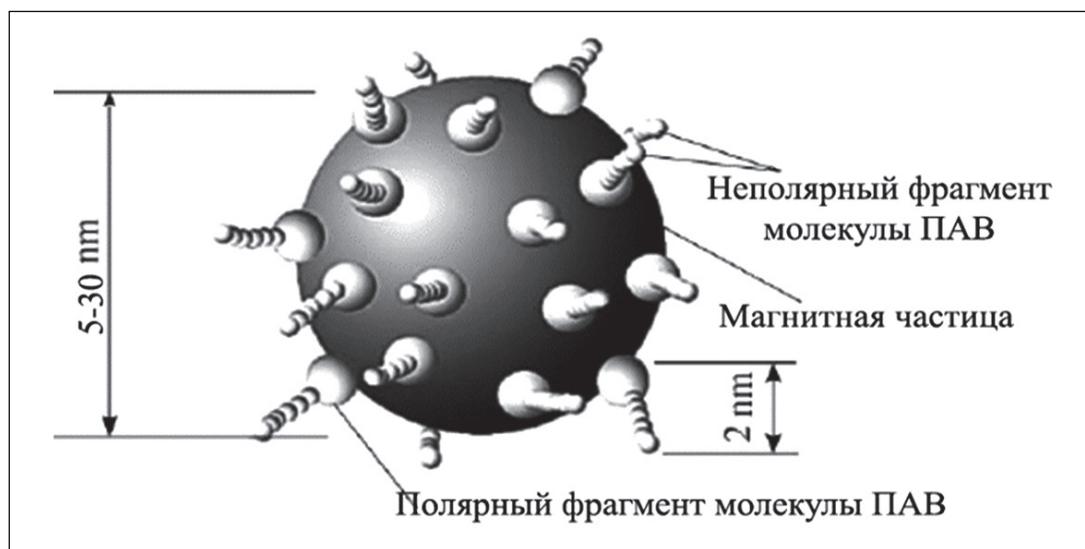


Рис. 4. Частица Fe_2O_3 с адсорбированным на ней слоем ПАВ

экспериментов [21]. В результате были определены оптимальные составы для обеспечения требуемого баланса адгезионной и когезионной прочности композитов.

В рамках данной работы для оценки структуры композитов выбрано фрактографическое исследование изломов образцов на растяжение, которое позволяет определить характер разрушения и способность композита сдерживать рост трещин.

Микроструктура композиционных материалов, а также морфология упрочняющих нанокремниевых

наполнителей исследовались на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Tescan MIRA3. Предварительно на поверхность образцов напылялась тонкая пленка углерода с помощью Polaron E6700, толщина покрытия составляла около 20 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поверхность излома эпоксидной смолы без наполнителей, а также ее типичная микроструктура приведены на рис. 5.

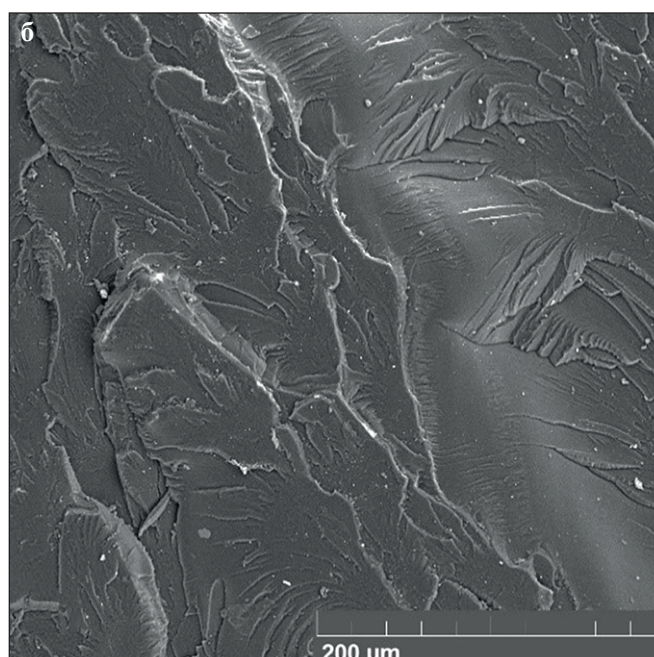
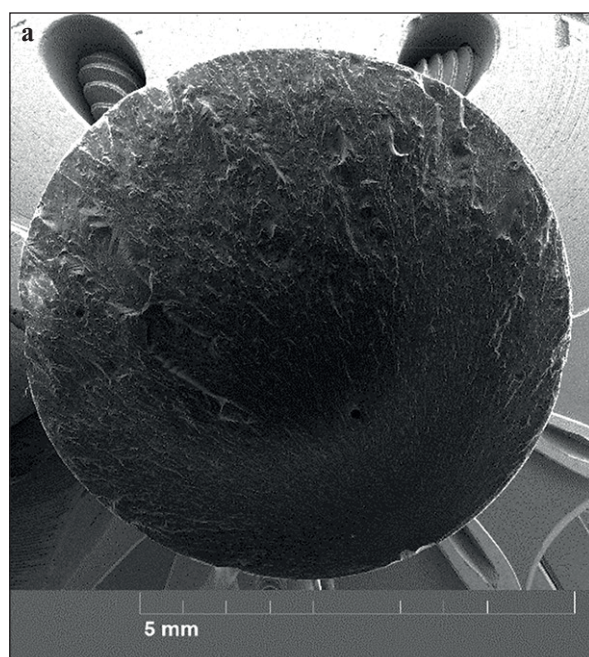


Рис. 5. Типичное макростроение (а) и микростроение (б) излома эпоксидной смолы без наполнителей

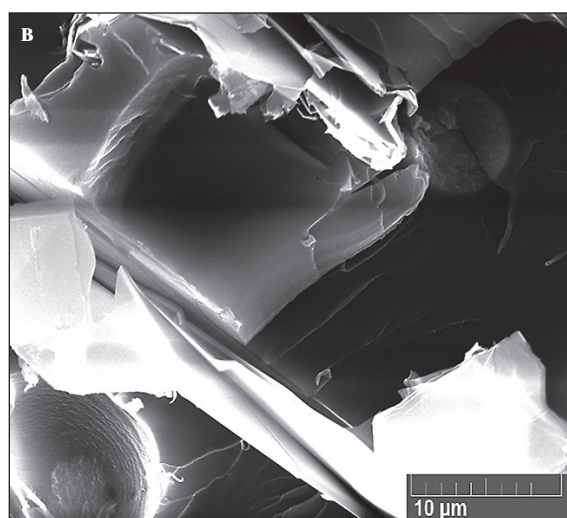
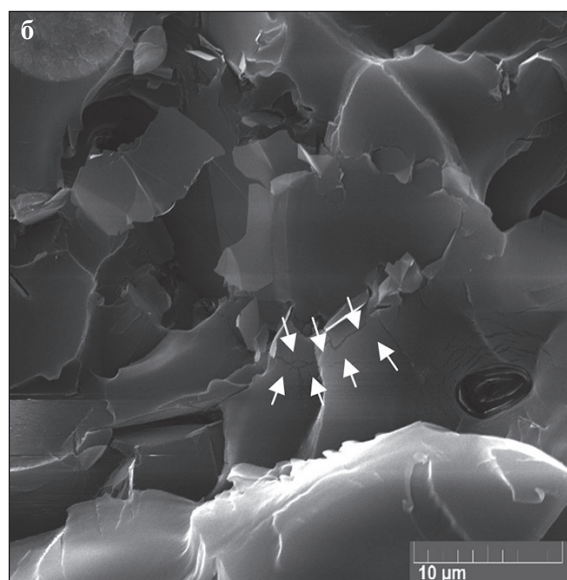
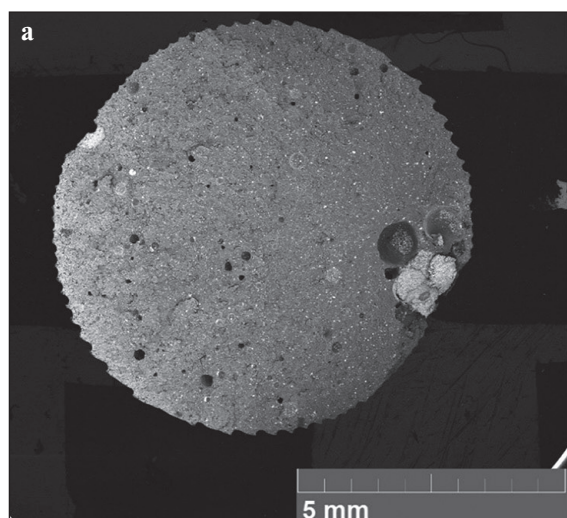


Рис. 6. Типичное макростроение (а) и микростроение (б, в) излома композита с наполнителем графен: стрелками обозначено ветвление микротрещины

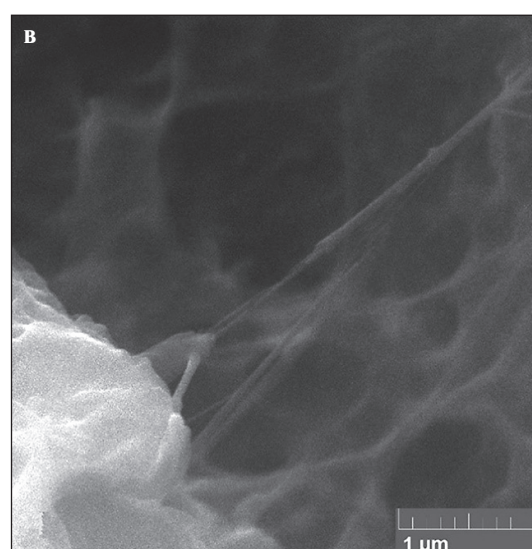
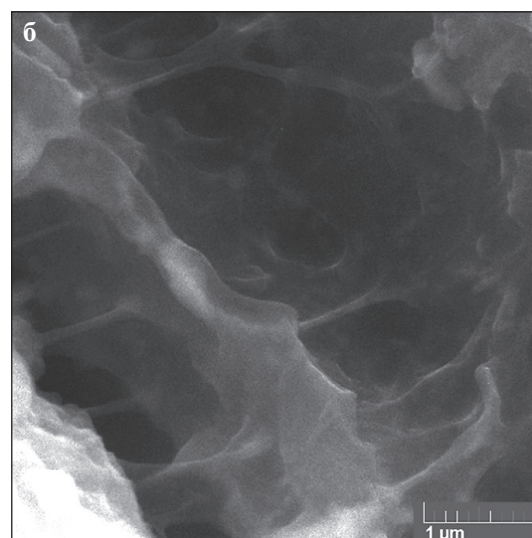
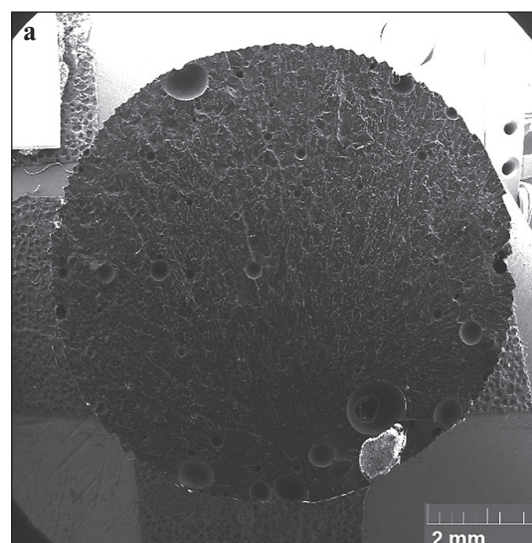


Рис. 7. Типичное макростроение (а) и микростроение (б, в) излома композита с наполнителем УНТ

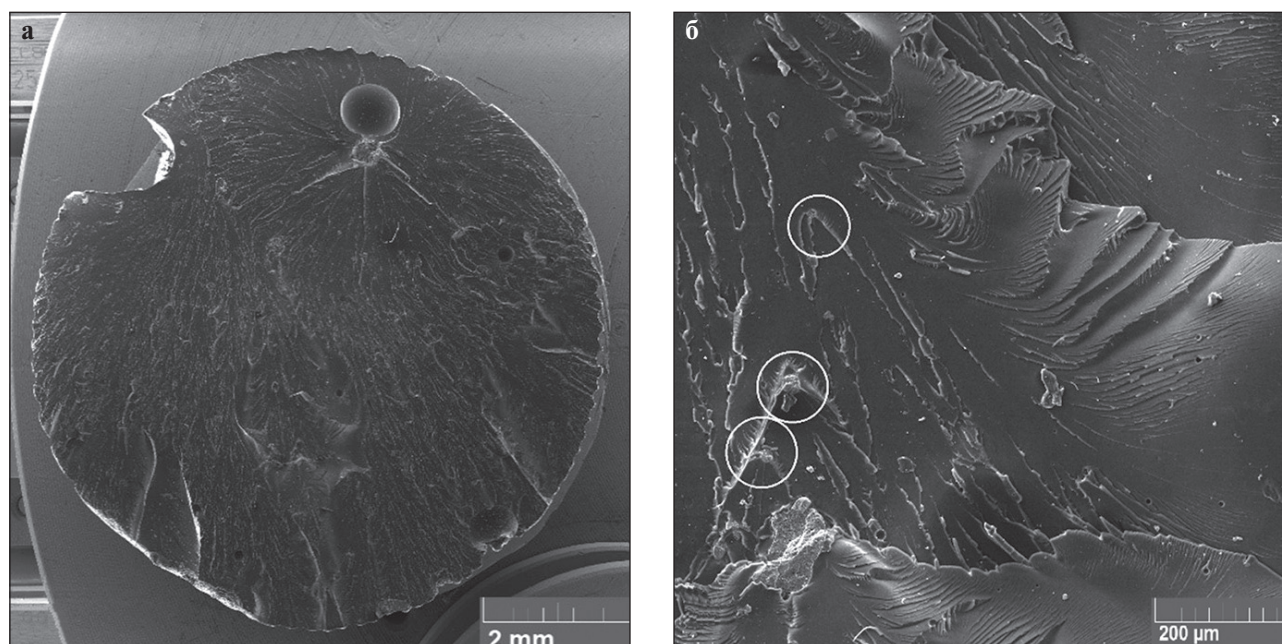


Рис. 8. Типичное макростроение (а) и микростроение (б) излома композита с наполнителем фуллерен: кругами обозначены места огибания фронта трещины агломератов фуллеренов

Видно, что разрушение носит хрупкий характер, так как излом является прямым. Наличие незначительного количества пор не влияет на распространение макротрещины. Наблюдаются также локальные области, свидетельствующие о течении материала в процессе его разрушения. На всей поверхности скола расположены протяженные микротрещины, ориентированные в направлении роста магистральной трещины при разрушении (рис. 5а). Распределение микротрещин имеет «веерообразный» характер (рис. 5б).

Добавление углеродных нанонаполнителей в эпоксидную смолу приводит к формированию большего количества пор, по сравнению с эпоксидной смолой без наполнителей (рис. 5а). Это связано с тем, что нанонаполнители обладают большой удельной площадью поверхности, в результате чего они могут адсорбировать эпоксидную смолу или отвердитель, меняя стехиометрию в локальных областях. Наноразмерные частицы также проявляют повышенную склонность к слипанию и образованию агломератов, размеры которых могут достигать сотен микрометров [11].

Добавление графена в композиционный материал приводит к образованию слоистой структуры (рис. 6б). Скол образца является прямым, что свидетельствует о хрупком характере разрушения (рис. 6а). Вероятностным механизмом упрочнения такого композита является то, что энергия трещины при ее раскрытии расходуется на преодоление сил трения между слоями композиционного материала

(рис. 6в), а также удлинение пути развития трещины в результате ее ветвления (рис. 6б).

Добавление в качестве наполнителя УНТ приводит к получению волокнистого композиционного материала (рис. 7б). Поверхность излома композита с УНТ, а также ее типичная структура представлены на рис. 7. Видно, что микротрещины распространяются радиально от места скопления пор. УНТ, закрепившись в стенах трещины, препятствуют раскрытию ее берегов (рис. 7б). Подобные результаты получены, например, в [26]. Механизмом упрочнения композиционных материалов с УНТ может являть то, что при раскрытии трещины энергия рассеивается за счет трения при вытягивании УНТ из эпоксидной матрицы (рис. 7в).

Добавление фуллеренов заметно не изменяет структуру исходной матрицы (рис. 5б), однако в образце появляется большая доля пластического разрушения (рис. 8а). Агломераты фуллеренов являются местами задержки фронта трещины, вынуждая его огибать себя (рис. 8б). Это приводит к образованию новых площадей поверхностей разрушения, увеличению длины фронта трещины и росту энергии, необходимой для разрушения материала. Подобные результаты были получены, например, в [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что добавление нанокремниевых наполнителей (графена, УНТ и фуллеренов) как армирующих компонентов в эпоксидное

связующее способствует изменению его структуры. Установлены вероятные механизмы упрочнения композиционных материалов при добавлении в них наноуглеродных наполнителей. В композите с графеном энергия трещины рассеивается за счет ветвления и удлинения пути ее развития. Углеродные нанотрубки, закрепившись в стенах трещины, препятствуют раскрытию ее берегов. Энергия трещины

также расходуется на преодоление сил трения при вытягивании УНТ из эпоксидной матрицы. Агломераты фуллеренов являются эффективными местами задержки фронта трещины, вынуждая его огибать себя, в результате чего образуются новые площади поверхностей разрушения. При этом происходит увеличение длины фронта и рост энергии, необходимой для разрушения материала.

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. № S. 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 теплоустойчивость / 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 эпоксидиановой смолы: автореф. на соиск. ученой степ. 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 степ. канд. техн. наук: 05.17.06. Бийск, 2012. 16 с.
14. Горбунов Ф.К., Шевцов Ю.Н., Бердникова Л.К. Термодинамические характеристики материалов, применяемых 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., Малышева 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.А. Брусенцева, К.В. Зобов, А.А. Филиппов, Д.Ж. Базарова, С.А. Лхасаранов, А.С. Чермошенцева, В.В. Сызранцев // 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 степ. 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, диагностике 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 степ. канд. техн. наук: 05.02.01. Барнаул, 2007. 19 с.
28. Крутиков И.Ю. Восстановление работоспособности деталей технических устройств с трещиноподобными дефектами композитными материалами: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Уфа, 2010. 124 с.
29. 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.
30. 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.
31. 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>
32. 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.
33. Тулинов А.Б., Иванов В.А., Гончаров А.Б. Прогрессивные технологии и материалы для восстановления горного оборудования // Современные технологии в горном машиностроении: сборник научных трудов семинара. М. 2012. 445 с.
34. Гвоздев А.А. Пути совершенствования технологии ремонта деталей и соединений составами ХМС — холодная молекулярная сварка // Владимирский земледелец. 2014. № 4(70). С. 39–40.
35. Березкин В.И., Викторovsky И.В., Вуль А.Я. Фуллереновые микрокристаллы как адсорбенты органических соединений // Физика и техника полупроводников. 2003. № 37(7). С. 802–810.
36. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 240 с.
37. Смирнов И.В. Моделирование физико-механических свойств и климатической стойкости эпоксидных композитов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Саранск, 2017. 252 с.

38. Перспективные технологии получения функциональных материалов конструкционного назначения на основе нанокмпозитов 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>

39. Елецкий А.В. Сорбционные свойства углеродных наноструктур // Успехи физических наук. 2004. № 174(11). С. 1191–1231.

40. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2013. 111 с.

41. 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.

42. 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.

43. 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>

Гульнара Рашитовна Халикова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», Уфимский государственный нефтяной технический университет; старший научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия, gulnara.r.khalikova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6712-8469>

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; анализ результатов исследований.

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

Халикова Г.Р. – помощь в проведении экспериментальной части исследования; обсуждение результатов исследований; выводы статьи.

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

Кузеев И.Р. – научное руководство; концепция исследований; составление плана экспериментальных работ; обсуждение результатов исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.05.2023; одобрена после рецензирования 24.05.2023; принята к публикации 02.06.2023.