

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ОБЛУЧЕННЫХ БАЗАЛЬТОВЫХ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИК-СПЕКТРОМЕТРИИ

© 2023 г. В. Д. Онискив^а, В. Ю. Столбов^{а, *}, Ю. Л. Макаревич^б

^а Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ),
Комсомольский пр., 29, Пермь, 614990 Россия

^б Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов (УНИИКМ),
Новозвягинская, 57, Пермь, 614014 Россия

*E-mail: valeriy.stolbov@gmail.com

Поступила в редакцию 30.04.2023 г.

После доработки 19.05.2023 г.

Принята к публикации 19.05.2023 г.

Работа связана с изучением относительно нового перспективного композитного материала на основе базальтовых волокон. В работе была предпринята попытка более глубокого исследования структурных изменений, которые происходят при облучении образцов базальтового композита потоками гамма-квантов, которые, в свою очередь, влияют на механические свойства. Изменения, произошедшие при радиационной модификации, были оценены с помощью механических испытаний и исследований с помощью инфракрасной спектроскопии. Обоснованно предполагается влияние структуры материала на упругие свойства облученного базальтового композита. Обнаружено, что модификация материала гамма-облучением приводит к повышению упругих свойств базальтового композита. В то же время величина деформации разрушения уменьшается. Анализ ИК-спектра в высокочастотной области показал, что радиационное воздействие приводит к продолжающимся реакциям полимеризации и межмолекулярному сшиванию. Однако когда доза излучения достигает 15 Мрад, происходит уменьшение числа связей в низкочастотной области спектра, что, по мнению авторов, соответствует разрушению алюминиево-кремниево-кислородного и органосиликатного каркасов.

Ключевые слова: базальтовый композит, радиационная модификация, механические испытания, ИК-спектроскопия, молекулярная структура, упругие свойства

DOI: 10.31857/S0023119323050091, **EDN:** MYFDHR

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования, связанные с изучением механических свойств базальтовых композитов и использованием этого материала для различных изделий и конструкций, были предметом значительного внимания многих ученых [1–9]. Базальтовый композит обладает серьезным потенциалом для самого широкого применения, предлагая отличное соотношение цены и качества, высокую стойкость к агрессивным средам щелочей и кислот, хорошие диэлектрические свойства, термостойкость, радиопрозрачность и простую технологию изготовления различных изделий. Упрощенная процедура производства непрерывного базальтового волокна заключается в следующем. Сначала базальтовое сырье нагревают до температуры плавления (1500°C). Затем расплав транспортируется через сливное устройство к платино-родиевым прядильным машинам для вытягивания и намотки на шпиндели. Энер-

гозатраты на производство базальтового непрерывного волокна (БНВ) в 20 раз меньше, чем у стали и металлопроката, а его удельная прочность на разрыв значительно превышает аналогичный показатель для легированных сталей [2]. Производство базальтового волокна требует значительно меньше энергии, чем производство, например, стекловолокна или углеродных волокон [9]. Следует учитывать, что базальт относится к числу минералов, широко распространенных на поверхности нашей планеты, что делает его очень доступным. На самом деле базальт — это минерал, полученный из затвердевшей вулканической породы, которая вылилась на поверхность земли. Важно отметить, что базальтовые породы являются одними из самых прочных природных силикатных пород. В отличие от сырья для производства, например, стекловолокна, базальтовая порода является готовым природным сырьем для производства волокон. Это позволяет получать сопоставимые

производственные затраты на БНВ и стекловолокно. Базальтовое волокно имеет развитую кластерную поверхность и обладает хорошими сорбционными свойствами [10]. В то же время гигроскопические свойства базальтового волокна в 6–8 раз ниже, чем у стекловолокна. Это качество, безусловно, очень важно для такой отрасли, как судостроение. Базальтовые волокна, по сравнению со стеклянными волокнами, имеют гораздо более широкий диапазон рабочих температур. Несмотря на то, что БНВ значительно вытеснил стекловолокно, его не следует рассматривать как прямого конкурента. Каждый из этих материалов имеет свою собственную область применения. Кроме того, идея их гибридного использования очень привлекательна.

Вышеупомянутые качества базальта и базальтокомпозитов позволяют говорить о хороших перспективах их применения в медицине. В первую очередь в области систем внешней фиксации при переломах костей и травмах. Базальтовые волокна используются при разработке высокоэффективных, гибких и недорогих протезов [11]. Его использование при разработке промышленных экзоскелетов также было бы разумным. Имеется успешный опыт применения базальта в стоматологии [12]. Сплавы титана и хрома с использованием базальта являются довольно распространенными материалами для эндопротезирования тазобедренного и коленного суставов. Между тем, требуемая усталостная прочность и совместимость поверхности все еще являются предметом исследований.

Привлекают внимание многочисленные активные попытки исследователей улучшить определенные характеристики материала путем введения нанотрубок в связующее, гамма-облучения, измельчения волокон, а также использования различных составов самого связующего [13–19]. Например, в [17] эффект модификации исследуемого материала достигается с помощью микроволнового излучения и введения в материал углеродных нанотрубок. В [18] в качестве наполнителя используется измельченная охра. В данной работе модификация осуществляется путем обработки материала потоками гамма-излучения в различных дозах. Целью такой модификации обычно является достижение высокого уровня адгезии между волокнами и полимерной матрицей. В этом случае свойства наполнителя (базальтового волокна) полностью реализуются.

Разработка гибридных полимерных материалов представляется весьма перспективной [20, 21]. Например, комбинация углеродных нитей и базальтовых волокон позволяет получить прочностные характеристики на 60% выше, чем у стекловолокна. Кроме того, такая гибридизация повышает водостойкость на 70% и значительно снижает стоимость материала [22].

Целью данного исследования является изучение влияния дозы гамма-излучения на механизмы молекулярной деструкции и межмолекулярного сшивания, приводящие к изменениям механических свойств и структуры базальтового композита. Эта работа является продолжением ранее выполненных работ по изучению механических характеристик модифицированных базальтовых композитов [22, 23]. В настоящем исследовании предпринята попытка обосновать физическое влияние гамма-облучения на механические свойства базальтовых композитов.

В научной литературе существуют две точки зрения на этот вопрос. Первый взгляд (который можно условно назвать “структурным”) предполагает, что процесс “сшивания” и формирования новой структуры, характеризующейся новыми механическими свойствами, происходит вследствие воздействия гамма-квантов на материал [24]. В то же время процесс “сшивания” сопровождается процессом разрушения межмолекулярных связей (“destruction”). По мере увеличения поглощенной дозы облучения начинает преобладать процесс деструкции связей, и материал постепенно разрушается. Как показали эксперименты авторов [22, 23], заметная деградация исследуемого базальтового композита очевидна при дозах облучения выше 15–20 Мрад. Вторая точка зрения (условно ее можно назвать “энергетической”) заключается в том, что благодаря воздействию концентрированного потока гамма-квантов в материал “закачивается” дополнительная энергия, позволяющая продолжить процесс структурирования материала, что также приводит к изменению механических свойств. По мнению авторов, обе точки зрения могут быть использованы для обоснования влияния гамма-облучения на свойства материала. Однако только дополнительные исследования и хорошо обоснованные гипотезы позволят полностью понять и объяснить физическую природу этого явления.

Следует отметить, что для изучения структуры материала используются различные методы. В частности, в работе [25] сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) использовался для изучения структуры полимерного композитного материала после его модификации путем введения углеродных нанотрубок и обработки высокочастотным излучением. Однако применение этого метода требует высокого качества поверхности образцов и удобно для материала, который является электропроводящим. Поэтому в данной работе для оценки уровня межмолекулярных связей был использован метод инфракрасной (ИК) спектроскопии. Метод ИК-спектроскопии успешно использовался во многих исследованиях. Например, в работах [26, 27] применение спектроскопии позволило качественно оценить появление новых структурных связей при радиационном воздействии на

Таблица 1. Основные характеристики базальтового ровинга

№	Наименование показателей	Требование NTD	Результат теста
1	Диаметр элементарного волокна, мкм	13 ± 0.5	13.21
2	Линейная плотность, текс	1200 ± 60	1214
3	Удельная разрывная нагрузка, мН/текс	Не менее 650	715
4	Содержание веществ, удаляемых при прокаливании, %	Не менее 0.4	0.5
5	Влажность, %	Не более 0.1	0.01

исследуемый материал. В настоящей работе ИК-спектрометрия используется для изучения структуры облученного базальтового композита в целом.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Необходимо учитывать, что свойства базальтового волокна в значительной степени зависят от его химического состава, который варьируется от месторождения к месторождению. Например, предел прочности при растяжении базальтового непрерывного волокна находится в довольно широком диапазоне 3000–5160 МПа, а модуль упругости колеблется от 79 до 93 ГПа [2]. В настоящих исследованиях для изготовления композитных образцов использовался ровинг НРБ13-1200-КВ-12 (производитель – компания “Каменный век”). Характеристики волокна приведены в табл. 1.

Связующее ЭДТ-10П использовалось в качестве полимерной матрицы для производства базальтового композита. Связующее имеет следующий состав: 100 частей смолы КДА (эпоксидно-диановая смола, модифицированная алифатической смолой, динамическая вязкость 4.5 при 25°C); 10 частей ТЕАТ-1 (триэтаноламинетитанат, $(C_6H_{12}O_3N)4Ti_3$, условная вязкость 60–200 с, при 50°C); 2 части продукта АДЕ-3 (диэтиламинометилтриэтоксисилан, активный отвердитель кремнийорганических и органических смол, $(C_2H_5)_2NCH_2-Si(OC_2H_5)_3$).

Для экспериментальных исследований были изготовлены кольцеобразные образцы, как показано на рис. 1. Внутренний диаметр образцов составлял 150 мм. Поперечное сечение колец имело прямоугольную форму: толщина и ширина составляли 4 и 10 мм соответственно. Измерения указанных размеров образцов проводились с точностью 0.01 мм. Визуальный осмотр образцов не выявил никаких дефектов. Некоторые незначительные изменения геометрических параметров, возникшие в процессе изготовления, были учтены при расчете напряжений.

Перед механическими испытаниями образцы были разделены на четыре группы. В первую группу вошли образцы, которые не подвергались процедуре гамма-облучения. Три последующие группы бы-

ли облучены дозами 5, 10, 15 Мрад соответственно. Готовые образцы базальтового композита облучали гамма-квантами в открытой атмосфере. Были использованы источники ионизирующего излучения Co^{60} . Средняя квантовая энергия этого излучения составляет 1.25 Мэв. Время воздействия, безусловно, зависело от дозы и составляло около 14 дней для дозы 15 Мрад. Небольшой размер образцов позволяет говорить о том, что облучение было равномерным. Чтобы стабилизировать состояние материала, механические испытания образцов были проведены через три месяца после облучения. Образцы хранились в нормальных условиях при комнатной температуре. Исследование включало испытания для определения упругих характеристик образцов и прочности на растяжение.

Кольцевые образцы при квазистатическом растяжении испытывались в соответствии с ГОСТ 25.603-82 и требований международного стандарта ISO/TTA 5:2007 Code of practice for creep/fatigue testing of cracked components с использованием электромеханической испытательной системы Instron 5882 (± 100 Кн) и навесного экстензометра Epsilon, показанных на рис. 2.

Образец закреплялся в захватах испытательной машины, после чего устанавливался навесной датчик деформаций (база измерения – 10 мм).



Рис. 1. Образец кольца из базальтового композитного материала.



Рис. 2. Образец в захватах испытательной машины.

Скорость нагружения в экспериментах составляла 2 мм/мин, образец нагружался до разрушения. На рис. 2 изображен образец в захватах испытательной машины с датчиком деформирования.

Исследования ИК-спектра поверхности образцов из базальтокомпозита было проведено в диапазоне $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ с использованием ИК-Фурье-спектрометра Nicolet 380 FT-IR. Также была использована приставка Smart Diffuse Reflectance, позволяющая анализировать сильно

рассеивающие свет твердые вещества. ИК-спектры были сняты методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Метод НПВО позволяет получать достаточно интенсивные сигналы в области низких частот. В нашем случае они представляют наибольший интерес. Образцы для ИК-спектрометрии были изготовлены из одного из колец. Оно было разрезано на фрагменты определенного размера (см. рис. 3а) с последующим гамма-облучением совместно с образцами для механических испытаний. Для обеспечения требуемого качества поверхности, производилась заливка материала эпоксидным связующим и тонкая шлифовка необходимой области (см. рис. 3б).

Поскольку базальт представляет собой комбинацию окислов различных металлов, их присутствие на поверхности материала было подтверждено проведением EDS-картирования с помощью растрового электронного микроскопа FEI Quanta 650 FEG. Зафиксированный элементный состав представлен в табл. 2.

Таким образом, в составе исследуемого базальтокомпозита присутствуют окислы кремния и окислы металлов: алюминия, железа, натрия, кальция, титана, калия и магния. Следует отметить, что высокий уровень содержания SiO_2 обеспечивает хороший уровень гибкости и химическую стабильность базальтового волокна. Окись алюминия Al_2O_3 — улучшает термическую стойкость, а окислы CaO , MgO , TiO_2 поддерживают на высоком уровне параметры водо- и коррозионной стойкости [28].

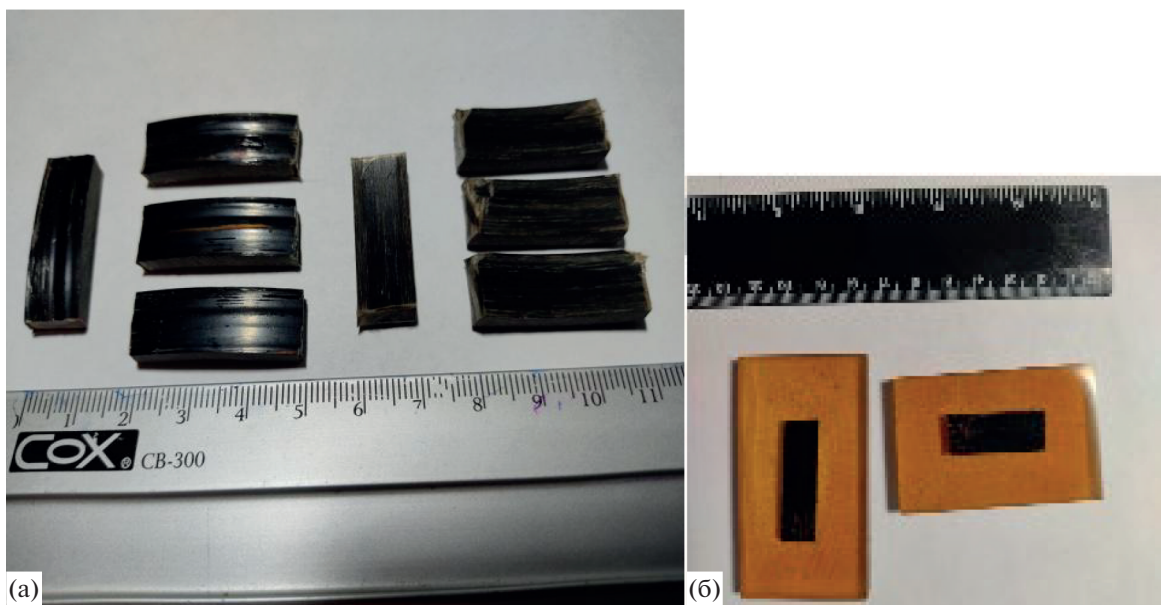


Рис. 3. Образцы, подготовленные для ИК-спектрометрии.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам испытаний были получены диаграммы нагружения (характерные диаграммы приведены на рис. 4), из которых были определены модули упругости и пределы прочности. Из рис. 4 видно, что после облучения происходит снижение предельной нагрузки при одновременном повышении модуля упругости.

Вычисленные и усредненные по группам образцов механические характеристики приведены в табл. 3.

Из приведенных результатов механических испытаний видно, что с увеличением дозы гамма-облучения материал становится более хрупким, а модуль упругости возрастает. Для полноты информации отметим, что удлинение на разрыв для всех испытанных образцов не превышало 1%.

На рис. 5. приведена ИК-спектрограмма для одного из образцов с радиационным воздействием в 10 Мрад. В целях идентификации межатомных связей с соответствующими частотами колебаний, была проведена процедура сглаживания по 25 точкам. Несложно заметить, что спектрограмма не содержит острых пиков в соседстве с горизонтальными участками. Таким образом, существенного искажения информации и потери определенной репрезентативности спектра не наблюдается. Вместе с тем “шумовая” информация заметно фильтруется, а все локальные максимумы и минимумы (отмечены на рис. 5) сохраняются.

Известно, что область спектра от 4000 до 2500 см^{-1} связана с валентными колебаниями гидроксильных (3300 см^{-1}) и аминных (3335 см^{-1}) групп [29, 30]. Полоса поглощения 2958 см^{-1} соответствует асимметричным валентным колебаниям CH_3 -группы, 2923 и 2854 см^{-1} — асимметричным и симметричным колебаниям CH_2 соответственно; 3037 см^{-1} — полоса ароматических протонов C—H, имеющих гибридизацию по типу sp^2 . Электронная гибридизация по типу sp^3 для связей C—H вызывает поглощение в частотах 2950–2850 см^{-1} . В области от 2500 до 1500 см^{-1} отмечаются частоты колебаний атомов с кратными валентными связями C=C, C=O, C=N. Ароматическое кольцо проявляет себя в виде двух пиков в точках близких к значениям 1600 и 1500 см^{-1} .

Следует отметить, что высокочастотные значения в спектре поглощения в данном случае связаны главным образом с молекулами эпоксидного связующего. Низкочастотную область волновых чисел от 1500 до 500 см^{-1} , в ИК-спектрометрии принято называть областью “отпечатков пальцев” [17]. Именно в этой области проявляют себя молекулы, составляющие базальтовое волокно.

Таблица 2. Элементный состав окислов базальтоком-позита

Элемент	Вес, %	Атомный вес, %
O	52.12	66.47
Na	3.04	2.7
Mg	2.85	2.39
Al	10.01	7.57
Si	23.39	17
K	0.8	0.42
Ca	3.94	2
Ti	0.74	0.32
Fe	3.1	1.13

Благодаря валентным колебаниям, свои “следы” в этой области также оставляют связи: C—C, C—N, C—O, N—O. Частоты деформационных колебаний в этой части спектра характерны и для связей C—H, N—H, O—H, а также для силоксанов и аминных групп. В области 1020–970 см^{-1} обычно проявляются оксиды, у которых один атом металла связан с более чем одним атомом кислорода. Оксиды металлов группы Me=O имеют волновые числа абсорбции в диапазоне 1100–825 см^{-1} . Валентные колебания Fe—O отражаются волновыми числами 460, 568 см^{-1} , а деформационные — 1170, 1300, 410 см^{-1} . Колебания связей Al—O обнаруживаются рядом волновых чисел: 559, 517, 451 и 422 см^{-1} .

Напомним, что молекулярная связь Si—O максимально представлена в базальте. Соответственно, ее валентные колебания имеют сильную полосу абсорбции в диапазоне 1100–1000 см^{-1} , а деформационные колебания проявляются в области — 460—

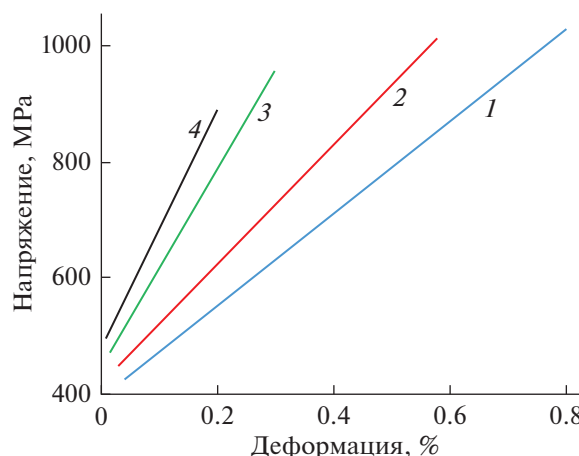


Рис. 4. Графики напряженно-деформированного состояния для образцов, облученных дозами: 0 (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4) Мрад.

Таблица 3. Результаты механических испытаний образцов

Доза (Мрад)	Максимальная нагрузка, Кн	Напряжение растяжения, МПа	Модуль упругости, ГПа
0	93.16	1034.5	81.65
5	87.35	1012.7	86.90
10	83.39	977.8	103.25
15	81.67	928.4	104.35

430 см^{-1} . Частота колебаний, соответствующая волновому числу 601 см^{-1} , указывает на наличие связи Ti—O. Металлические связи (Me—O) могут также обнаруживаться и в области волновых чисел 700–590 см^{-1} . Полоса поглощения в диапазоне 1490–1420 см^{-1} вероятно относится к поглощению, характерному для молекулы Mg—O. Необходимо заметить, что в диапазоне волновых чисел 1270–500 см^{-1} присутствует интенсивная полоса, характеризующая колебания эпиксидного кольца, поэтому однозначно выделить индивидуальные полосы, характерные для оксидов металлов, не всегда представляется возможным.

Результаты ИК-спектроскопии, отражающие изменение спектра при гамма-облучении, показаны на рис. 6.

Как видно из рис. 6, интенсивность поглощения почти всюду увеличивается в соответствии с ростом дозы облучения, монотонно “поднимая” график в рассматриваемом частотном диапазоне. Исключением является область в точке минимума – 1250 см^{-1} . Сохранение общего характера ИК-спектров в высокочастотной области вероятно связано с продолжением реакции полимеризации в процессе облучения.

В низкочастотной области радикалы, обладающие определенной подвижностью и созданные радиационным воздействием, вступают в новые химические связи. Значительный рост поглощения в области 1000 см^{-1} наиболее вероятно связан с образованием органо-силикатных соединений –C—O—Si– (волновое число 1072 см^{-1}). По мне-

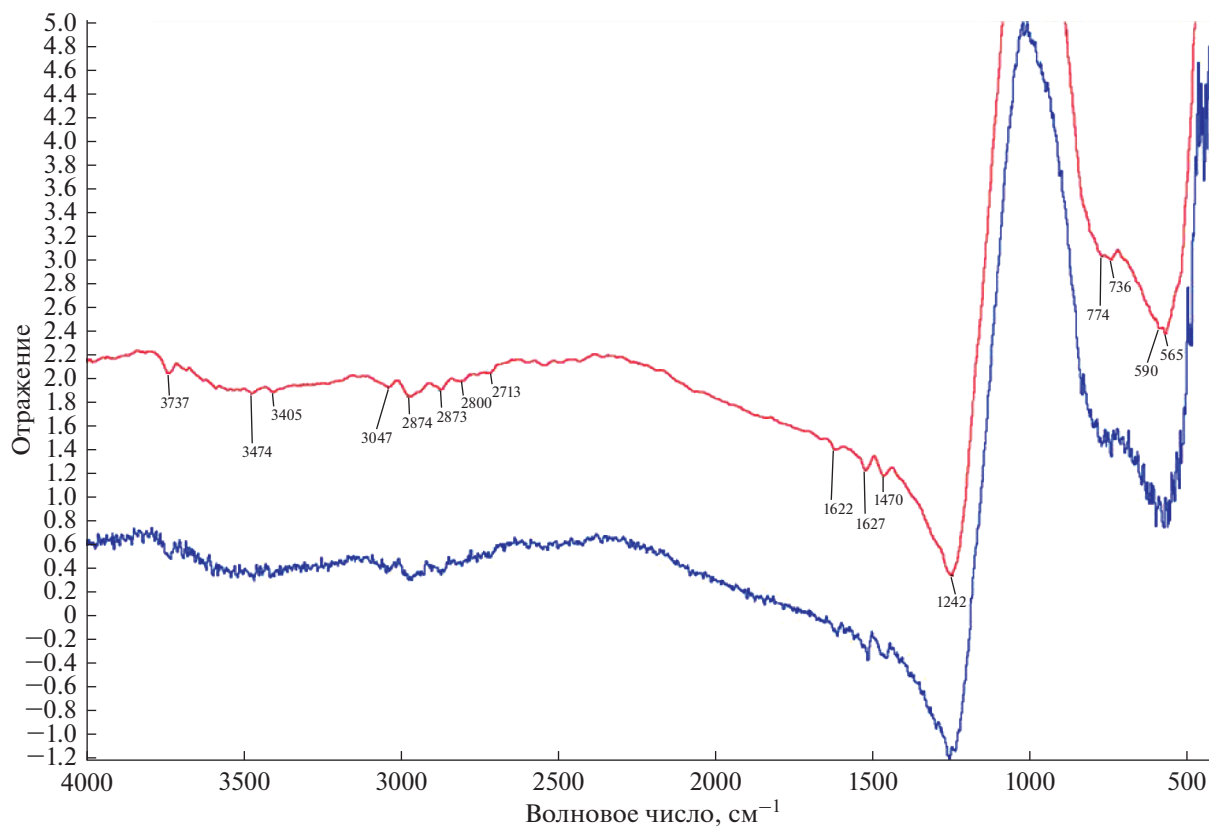


Рис. 5. Сглаживание ИК-спектра (синий — до сглаживания, красный — после).

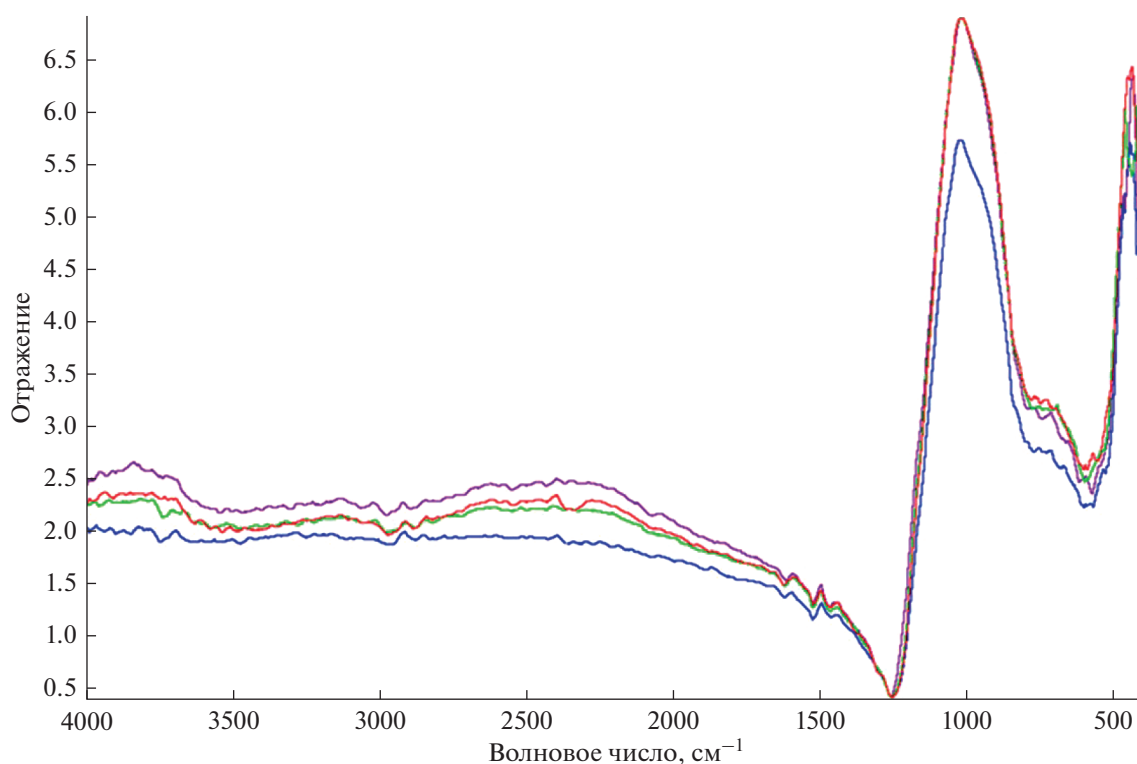


Рис. 6. ИК-спектры образцов при различных дозах облучения (синий — до облучения, зеленый — 5 Мрад, красный — 10 Мрад, коричневый — 15 Мрад).

нию авторов, это связано с тем, что силикатная группа базальта является наиболее распространенной и активной, а связь С–Н в эпоксидном связующем достаточно легко разрывается в процессе радиационного облучения. Таким образом формируется трехмерные структуры с химически встроенным базальтовым наполнителем. Вполне допустимо и образование алюмосиликатного соединения Si–O–Al, имеющего частоты деформационных колебаний — 535, 678 см^{−1}. Формирование молекулярного каркаса весьма динамично протекает в самом начале процесса облучения (до 5 Мрад). При достижении дозы в 15 Мрад происходит уменьшение интенсивности абсорбции в области волновых чисел 800–400 см^{−1}, характерной для деформационных колебаний алюмокремний-кислородного каркаса. Разумным является предположение о преобладании процесса деструкции. Эта стадия процесса облучения связана с исчерпанием в материале молекулярных радикалов, имеющих необходимую для вступления в химические связи степень подвижности. Появляющиеся в результате деструкции фрагменты молекул в подавляющем большинстве слишком громоздки и поэтому малоподвижны.

Как уже отмечалось, радиационная инициация процессов сшивки связана с образованием новых межмолекулярных связей. Формирование

пространственной сетки подобных связей с плотностью n_c (размерность — моль/см³) приводит к изменению макроскопических свойств материала. В частности, происходит заметное изменение модуля упругости исследуемого материала. Для оценки этих изменений можно воспользоваться известным соотношением [31], полученным в рамках классической теории высокой эластичности для условного напряжения σ :

$$\sigma = n_c P T \left(\lambda - 1/\lambda^2 \right),$$

где T — температура, R — универсальная газовая постоянная, λ — мера деформации, $\lambda = L/L_0 = (\Delta L + L_0)/L_0 = 1 + \epsilon$.

Поскольку деформации в рассматриваемом случае ограничены уровнем 1.0–1.5% и $(1 + \epsilon)^2 \approx 1$, тогда $(\lambda - 1/\lambda^2) = (1 + \epsilon - 1/(1 + \epsilon)^2) \approx \epsilon$. Предполагая, что зависимость напряжений и деформаций линейна, можно записать равенство

$$\sigma = E \epsilon = n_c R T \epsilon.$$

Таким образом, оценка модуля упругости будет следующей: $E = n_c P T$. Соответственно, плотность сетки: $n_c = E/(RT)$.

Предполагая, что температура постоянна, нетрудно получить ожидаемое изменение плотности сетки в материале при различных дозах облу-

чения. Сравнивая модуль упругости базальтового композита, облученного дозой 15 Мрад, с начальным значением модуля (до облучения материала), получаем оценку плотности сетки:

$$n_c(15) = n_c(0)E(15)/E(0).$$

Таким образом, для приведенных в табл. 3 значений модулей упругости следует ожидать увеличения плотности сетки межмолекулярных связей: $n_c(15) = 1.28n_c(0)$. Очень важно отметить, что характер оценки исключительно интегральный, т.е. по совокупности всех частот ИК-спектра. При этом в локальных частях спектра могут присутствовать как участки межмолекулярной сшивки, так и участки деструкции. Из результатов, приведенных на рис. 6, видно, что интенсивность поглощения после радиационного воздействия в исследованном интервале доз в среднем повысилась примерно на 25%. Это подтверждает предположение, что основной эффект радиационной модификации композита, связанный с повышением упругих свойств материала, объясняется появлением новых межмолекулярных связей [32, 33].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования механических свойств кольцевых образцов, изготовленных из базальтокомпозита и обработанных различными дозами гамма-облучения было установлено.

С увеличением дозы облучения значения предела прочности на разрыв исследованного материала имеют тенденцию к падению, а значения модуля упругости растут.

Сохранение общего характера ИК-спектров в высокочастотной области вероятно связано с продолжением реакции полимеризации в связующем материале в процессе облучения.

Анализ ИК-спектра базальтокомпозита выявил особенности воздействия излучения на материал. Обнаружено, что при малых дозах облучения наблюдается рост числа межмолекулярных связей как в высокочастотной, так и низкочастотной областях спектра. Однако при достижении дозы облучения в 15 Мрад отмечается снижение числа связей в низкочастотном диапазоне спектра, что, на взгляд авторов, соответствует деструкции алюмо-кремниево-кислородного и органо-силикатного каркасов.

Основной причиной, по которой деструктивные процессы становятся преобладающими при высоких дозах облучения, по нашему мнению, является исчерпание числа подвижных радикалов в облучаемом материале.

Использование макропоказателей материала (модулей упругости) и соотношений теории вы-

сокой эластичности позволяет удовлетворительно оценивать средний уровень возникающих межмолекулярных связей.

Таким образом, можно констатировать, что гамма-облучение базальтокомпозита дозами не более 15 Мрад приводит к получению более “жесткого” материала с повышенными упругими характеристиками. При достижении дозы облучения 15 Мрад начинается интенсивный процесс деструкции межмолекулярных связей, что приводит к резкому снижению прочностных свойств базальтокомпозита.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность кандидату химических наук С.А. Астафьевой (ИХТТ УрО РАН) за плодотворное обсуждение результатов исследований и участие в ряде экспериментов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Это исследование было проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы деятельности Пермского научно-образовательного центра “Рациональное недропользование” и проекта Международной исследовательской группы (С-26/591).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Оснос М.С., Оснос С.П.* Базальтовые непрерывные волокна — основа для создания нового промышленного производства и широкого применения армирующих и композиционных материалов // Составной мир. 2019. № 1. С. 58–65.
2. *Оснос С.П., Рожков А.И., Федотов А.А.* Базальтовые непрерывные волокна: характеристики и преимущества. Сырье, технологии и оборудование. Создание фабрик и материалы // Составной мир. 2022. № 2. С. 18–27.
3. *Dhand V., Mittal G., Rhee K.Y., Park S.J., Hui D.* A short review on basalt fiber reinforced polymer composites // Compos Part B Eng. 2015. № 73. P. 166–180.
4. *Szabo P.J., Reti T., Czigany T.* Investigation of Basalt Fiber Reinforced Polyamide Composites // Materials science Forum. 2008. V. 589. P. 7–12.
5. *Dorigato A., Pegoretti A.* Fatigue resistance of basalt fibers-reinforced laminates // J. Compos Mater. 2012. V. 46. № 15. P. 1773–1785.
6. *Liu H., Yu Y., Liu Y., Zhang M., Li L., Ma L., Sun Y., Wang W.* A review on basalt fiber composites and their applications in clean energy sector and power grids // Polymers. 2022. V. 14. P. 2376.
7. *Liu Y., Zhang M., Liu H., Tian L., Liu J., Fu C., Fu X.* Properties of basalt fiber core rods and their application in composite cross arms of a power distribution network // Polymers. 2022. V. 14. P. 2443.
8. *Yan L., Chu F., Tuo W., Zhao X., Wang Y., Zhang P., Gao Y.* Review of research on basalt fibers and basalt fiber-rein-

- forced composites in China (I): Physicochemical and mechanical properties // *Polymers and Polymer Composites*. 2021. V. 29. № 9. P. 1612–1624.
9. Fitzgerald A., Pround W., Kandemir A., Murphy R.J., Jesson D.A., Trask R.S., Hamerton I., Longana M.L. A life cycle engineering perspective on biocomposites as a solution for a sustainable recovery // *Sustainability*. 2021. V. 13. № 3. P. 1160.
10. Чувашов Ю., Яценко О., Дидука И., Гулик В. Исследование состояния поверхности волокон из базальтоподобных пород для расширенного промышленного применения // *Журнал о натуральных волокнах*. 2020. Т. 19. № 8.
11. Baptista R., Marat-Mendes R., Fortes C., Gil R., Queiroga B. Comparison of mechanical behavior of basalt and carbon fiber reinforced composites applied to a prosthesis device // *6th Congresso Nacional De Biomechanica*. Monte Real, Leiria, Portugal, 6–7 de fevereiro. 2015. P. 1–6.
12. Karavaeva E.M., Rogozhnikov G.I., Nyashin Y.I., Nikitin V.N. Biomechanical modelling of application of splinting fiber on the basis of basalt in the treatment of patients with parodontal diseases // *Russian Journal of Biomechanics*. 2015. V. 19. № 1. P. 106–115.
13. Охлопкова А.А., Васильев С.В., Гоголева О.В. Исследование влияния базальтового волокна на физико-механические и триботехнические характеристики композитов на основе политетрафторэтилена // *Арктика. 21 век. Технические науки*. 2014. Т. 1. № 2. С. 11–19.
14. Старовойтова И.А., Зыкова Е.С., Сулейманов А.М. и др. Исследование физико-механических характеристик наномодифицированного базальтового ровинга и композитного материала на его основе // *Известия КГУАЭ*. 2016. № 3. С. 217–222.
15. Ефанова В.В. ИК-спектроскопическое исследование взаимодействия полимерной матрицы с поверхностью активированной базальтовой окалины // *Украинский химический журнал*. 2000. Т. 66. № 3. С. 59–62.
16. Арзамасцев С.В., Артеменко С.Е., Павлов В.В. Структура и свойства базальтопластика на основе полиамида-6 // *Пластмассы*. 2011. № 5. С. 60–64.
17. Shcherbakov A., Mostovoy A., Bekeslev A., Burmistrov I., Arzamastsev S., Lopukhova M. Effect of microwave irradiation at different stages of manufacturing unsaturated polyester nanocomposite // *Polymers*. 2022. V. 14. № 21. P. 4594.
18. Bekeslev A., Mostovoy A., Tastanova L., Kadykova Y., Kalganova S., Lopukhova M. Reinforcement of Epoxy Composites with Application of Finely-ground Ochre and Electrophysical Method of the Composition Modification // *Polymers*. 2020. V. 12. № 7. P. 1437.
19. El-Hadi Z.A. Gamma Ray Interaction with Some High-Lead Glasses Containing Chromium Ions // *J. of Solid State Chemistry*. 2002. V. 163. № 2. P. 351–363.
20. Артеменко С.Е., Кадыков Ю.А. Модификация базальтопластиков гибридизацией базальтовых нитей с неорганическим наполнителем // *Пластмассы*. 2009. № 1. С. 11–13.
21. Кудинов В.В., Корнеева Н.В., Крылов И.К. и др. Гибридные полимерные композиционные материалы // *Физика и химия обработки материалов*. 2008. № 2. С. 32–37.
22. Makarevich Yu.L., Oniskiv V.D., Stolbov V.Yu. Effect of modification on strength properties functional composites // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. V. 315. P. 464–470.
23. Makarevich Yu.L., Oniskiv V.D., Stolbov V.Yu. and Gitman I. Effect of Gamma Irradiation on Strength Properties of Basalt Composites // *Mechanics of Composite Materials*. 2022. V. 58. № 1. P. 43–55.
24. Скрозников С.В., Зеленцова Н.С., Лямкина Д.Э. и др. Особенности структурных и механических свойств радиационно-сшитого полиэтилена для изоляции кабелей // *Достижения в области химии и химической технологии*. 2010. Т. 24. № 3. С. 77–81.
25. Al-Harhi M.A. Influence of applying microwave radiation on the LDPE/MWCNTs nanocomposite // *Polymer Composites*. 2014. V. 35. № 10. P. 2036–2042.
26. Mussaeva M.A., Ibragimova E.M. Electron microscopy and elemental composition of the near-surface layer of electron-irradiated LiF crystals // *Tech. Phys. Lett.* 2019. V. 45. № 2. P. 155–158.
27. Ibragimova E.M., Salakhitdinov A.N., Salakhitdinova M.K., Yusupov A.A. Effect of Gamma Radiation on Absorption of Light in Potassium-Aluminoborate Glasses with Additions of Iron Oxide // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2018. V. 85. № 2. P. 255–260.
28. Singha K. A short review on basalt fiber // *Int J Text Sci*. 2012. V. 1. № 4. P. 19–28.
29. Mayo D.W., Miller F.A., Hannah R.W. Course notes on the interpretation of infrared and raman spectra. New Jersey: John Wiley & Sons. 2003.
30. Накамото К. ИК- и рамановские спектры неорганических и координационных соединений. М: Мир, 1991.
31. Аскадский А.А., Матвеев Ю.И. Химическая структура и физические свойства полимеров. М.: Химия. 1983.
32. Нуруллаев Э.М., Онискив В.Д. Механические характеристики композиционного материала на основе гамма-облученных низкомолекулярных каучуков // *Химия высоких энергий*. 2021. Т. 55. № 2. С. 150–154.
33. Нуруллаев Э.М., Онискив В.Д., Астафьева С.А., Лебедева Е.А. Влияние гамма-излучения на механические и структурные характеристики АБС-пластика на основе высокомолекулярного технического полимера акрилонитрилбутадиенстирола // *Химия высоких энергий*. 2022. Т. 56. № 6. С. 439–444.