



Научная статья

2.6.17 – Материаловедение (технические науки).

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)

УДК 678.027.776 (043.2)

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.037



ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

Егор Германович Сакошев ¹, Алексей Николаевич Блазнов ²,
Николай Валерьевич Бычин ³,

^{1, 2, 3} Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Бийск, Россия

¹ 89139984903@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2454-2573>,

² blaznov74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9123-159X>,

³ labmineral@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7251-7741>

Аннотация. Проведены исследования механизмов разрушения после испытания на механическое сжатие контрольных и предварительно термохимически состаренных базальтопластиков кольцевой формы, изготовленных на основе армирующего наполнителя (ровинга) НРБ 19-1200-КВ-42 и двух различных связующих: первый с отвердителем аминного типа ЭД-20+Этал-23Х, а второй с ангидридным – связующее ЭДИ. С использованием оптического электронного микроскопа изучена поверхность образцов в области их разрушения и выявлены основные механизмы снижения прочностных характеристик ПКМ, которые заключаются в расслаивании волокон от полимерной матрицы, её растрескивании, распространении трещин в структуре композиционного материала и т.п.

Ключевые слова: химическая стойкость, старение, полимерные композиты, аминные отвердители, коэффициент химической стойкости, ангидридные отвердители, макроразрушение.

Финансирование: Исследования ИПХЭТ СО РАН выполнены в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ (код научной темы FUFЕ-2024-0008, № госрегистрации темы 124021200031-4) при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

Для цитирования: Сакошев Е. Г., Блазнов А. Н., Бычин Н. В. Исследование механизмов разрушения композитных изделий после воздействия химически агрессивных сред // Ползуновский вестник. 2026. № 1. С. 236–239. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.037. EDN: <https://elibrary.ru/UHFHDO>.

Original article

INVESTIGATION OF MECHANISMS OF DESTRUCTION OF COMPOSITE MATERIALS AFTER EXPOSURE TO CHEMICALLY AGGRESSIVE MEDIA

Egor G. Sakoshev ¹, Aleksey N. Blaznov ², Nikolay V. Bychin ³

^{1, 2, 3} Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Biysk, Russia

¹ 89139984903@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2454-2573>,

² blaznov74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9123-159X>,

³ labmineral@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7251-7741>

Abstract. Studies of the mechanisms of destruction after mechanical compression testing of control and pre-thermochemically aged ring-shaped basalt plastics made on the basis of reinforcing filler (roving) have been carried out NRB 19-1200-KV-42 and two different binders: the first with an amine type hardener ED-20+Ethal-23X, and the second with an anhydride binder EDI. Using an optical electron microscope, the surface of the samples in the area of their destruction was studied and the main mechanisms for reducing the strength characteristics of FRP were identified, which consist in delamination of fibers from the polymer matrix, its cracking, propagation of cracks in the structure of the composite material, etc.

Keywords: chemical resistance, aging, polymer composites, amine hardeners, chemical resistance coefficients, anhydride hardeners, macro degradation.

Acknowledgements: Research at the IPCET SB RAS was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (scientific topic code FUFЕ-2024-0008, state registration number of the topic 124021200031-4) using the equipment of the Biysk Regional Center for Shared Use of Scientific Equipment of the SB RAS (IPCET SB RAS, Biysk).

© Сакошев Е. Г., Блазнов А. Н., Бычин Н. В., 2026

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

For citation: Sakoshev, E.G., Blaznov, A.N. & Bychin, N.V. (2026). Investigation of mechanisms of destruction of composite materials after exposure to chemically aggressive media. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 236-239. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.01.037. EDN: <https://elibrary.ru/UHFHDO>.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование влияния воздействия агрессивных химических сред на прочностные характеристики полимерных композиционных материалов (ПКМ) на сегодняшний день является актуальной задачей, так как композиты находят применение практически во всех отраслях промышленности. В таких областях, как электротехническая, нефтегазовая, химическая и горнодобывающая промышленность, изделия из композитов подвергаются влиянию агрессивной окружающей среды в течение длительного срока эксплуатации [1, 2]. Для оценки воздействия химически агрессивных сред на ПКМ необходимо провести идентификацию повреждений на поверхности образцов и определить морфологии макро- и микроповреждений в зонах разрушения, как это сделали авторы работ [3, 4].

Исследование химической стойкости полимерных материалов регламентируется стандартом ГОСТ 12020-2018 [5]. Сущность метода заключается в погружении образцов в испытательную жидкость на заданное время при определенной температуре. Свойства образцов определяют до погружения и после извлечения из испытательной жидкости, а также после сушки, если ее проводят. Определение свойств после сушки проводят последовательно на тех же образцах.

ГОСТ 12020-2018 регламентирует определение изменения массы, размеров и внешнего вида образцов после извлечения из среды воздействия и последующей сушки. Также исследуется изменение механических, термических и других характеристик. Количественно оценивается водопоглощение и абсорбция испытательных сред полимерным материалом.

В работе [6] авторы исследовали влияние кислотной среды на поглотительные, морфологические, механические, структурные и термические свойства гибридных ПКМ. Был сделан вывод о том, что действие кислотных сред однозначно сказывается на морфологии образцов и физико-механических характеристиках.

В выполненных нами ранее работах [7] по проведению ускоренного термохимического старения композитов, изготовленных в виде колец, с последующими испытаниями на сжатие были в итоге определены количественные характеристики, такие как коэффициенты химической стойкости, водопоглощение и абсорбция среды.

Цель данного исследования заключалась в определении механизмов разрушения образцов ПКМ и установлении закономерностей между изменением свойств в результате химического старения и структуры композитов.

Для достижения этой цели решались задачи, заключающиеся в определении морфологии области повреждения, и сравнение результатов с прочностными характеристиками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами для настоящего исследования являлись композитные кольца шириной около 10 мм, изготовленные путём нарезания изделий в виде труб в промышленных условиях АО «НПП «Алтик».

Материалами, из которых изготовлены композитные кольца, являлись эпоксидные связующие двух

типов на основе аминного и ангидридного отвердителя. В качестве эпоксидной смолы использовалась ЭД-20. В качестве аминного отвердителя использовался Этал-23Х. В качестве эпоксидангидридного связующего использовали ЭДИ с отвердителем ИМТГФА и ускорителем полимеризации УП-606/2. В качестве армирующих наполнителей использовали базальтовый ровинг НРБ 19-1200-КВ-42.

С целью определения механических характеристик образцов проводили испытания на сжатие колец (рисунок 1), не подвергнутых старению (исходных), состаренных в 10%-ном растворе NaOH и в 10%-ном растворе H₂SO₄ при температуре 70 °С в течение 42 часов.

По значению разрушающей силы определяли напряжение в образцах по формуле:

$$\sigma = \frac{F}{2S},$$

где S – площадь поперечного сечения кольца, мм² (S=a·b), где a, b – толщина и ширина кольца, мм.

where S – the cross-sectional area of the ring, mm² (S=a·b), where a, b are the thickness and width of the ring, mm.

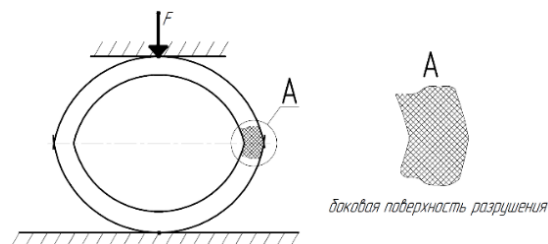


Рисунок 1 – Схема механических испытаний на сжатие образцов, где F – усилие сжатия, A – исследуемая поверхность разрушения

Figure 1 – Scheme of mechanical compression testing of samples, where F - the compressive force and A - the fracture surface under study.

Для определения морфологии области разрушения образцов использовали оптический электронный микроскоп.

Исследуемая поверхность разрушения представлена на схеме механических испытаний образцов на сжатие рисунке 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Коэффициент химической стойкости (в %) определили как отношение разрушающего напряжения после химического старения к исходному значению.

Результаты определения химической стойкости для всех образцов по данным работы [7] приведены в таблице 1.

Для исследования структуры в настоящей работе выбраны образцы № 1, 2, изготовленные на одинаковом ровинге, но с разными отвердителями связующих, показавшие наихудший и наилучший результат в разных средах.

При исследовании боковой поверхности в области разрушения образцов композитных колец № 1 после механических испытаний на сжатие обнаружены видимые характеристики поверхности разрушения (трещины, изломы, пустоты и др.) образцов, которые представлены на рисунке 2.

Таблица 1 – Химическая стойкость образцов по средам / Table 1 – Chemical resistance of samples by media

№	Ровинг	Связующее	Коэффициент химической стойкости, %	
			NaOH	H ₂ SO ₄
1	НРБ 19-1200-КВ-42	ЭД-20+Этал-23Х	71,16	19,56
2		ЭДИ	13,29	73,80
3	UMAFIBECR 120-17-1200	ЭД-20+Этал-23Х	85,86	36,57
4		Еpilox	92,82	76,03
5		ЭДИ	62,21	104,28
6		ЭДИ+Этал 1	75,70	111,53
7	GLASS-TEX ECR 22-1200-602A	ЭД-20+Этал-23Х	81,42	21,23
8		Еpilox	74,97	68,09
9		ЭДИ	62,81	87,90

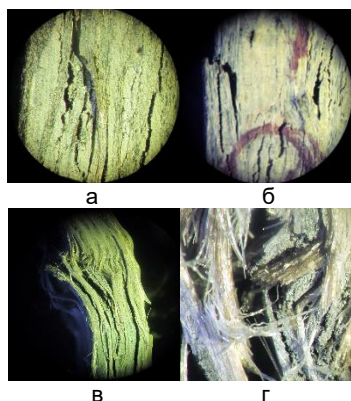


Рисунок 2 – Фотографии области разрушения образцов № 1: неподверженных старению (а); состаренных в 10%-ном растворе NaOH (б); в 10%-ном растворе H₂SO₄ (в, г)

Figure 2 – Photographs of the destruction area of samples № 1: non-aging (а); aged in 10% NaOH solution (б); in 10% H₂SO₄ solution (в, г).

В области разрушения на боковой поверхности несостаренных композитных образцов (рисунок 2, а) наблюдаются разрастающиеся макротрещины, которые возникли из-за сжимающего напряжения, приложенного к композитному кольцу, что привело к растрескиванию полимерной матрицы и излому волокон. Разрушение образцов, подвергнутого старению в 10%-ном растворе NaOH (рисунок 2, б), характеризуется образованием расширяющихся трещин в структуре полимерного материала. При этом видимой картиной деградации армирующих волокон с внутренней стороны кольца является их разрушение, а с внешней – излом. Наиболее выраженную картину разрушения при сжатии показали кольца, состаренные в 10%-ном растворе серной кислоты (рисунок 2, в, г). Отмечается наличие пустот и большого количества глубоких и искривленных трещин, наблюдаемых в структуре ПКМ, что свидетельствует о тотальном разрушении композиционного материала. При этом волокна армирующего ровинга отслаиваются и от матрицы, и друг от друга, приобретая хаотично разбросанную пространственную конфигурацию. Скорее всего, данный эффект вызван явлением пластификации связующего, которое упоминается в работе [6] при старении гибридных композиционных материалов в кислых средах.

Поверхности макроразрушений образцов колец № 2, исходных и прошедших старение в уже упомянутых выше условиях, представлены на рисунке 3.

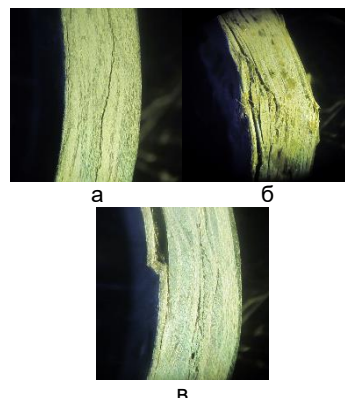


Рисунок 3 – Фотографии разрушения образцов композитных колец № 2 после механических испытаний на сжатие: неподверженных старению (а); состаренных в 10%-ном растворе NaOH (б); в 10%-ном растворе H₂SO₄ (в)

Figure 3 – Photographs of the destruction of composite ring samples № 2 after mechanical compression tests: non-aging (а); aged in 10% NaOH solution (б); in 10% H₂SO₄ solution (в)

На рассматриваемых боковых поверхностях несостаренных образцов в области разрушения (рисунок 3, а) обнаруживаются в малом количестве узкие продолговатые трещины, распространяющиеся преимущественно по окружности – вдоль направления волокон. В результате старения композитных колец в растворе гидроксида натрия их боковая поверхность высоконагружаемой зоны при сжатии (рисунок 3, б) характеризуется появлением большого количества дефектов. Обнаруживаются явления расслаивания ровинга и полимерной матрицы с отчетливым расширением трещин и пустот, а также области разрушения и разрывов волокон. Это также может быть объяснено явлением гидролиза или пластификации полимерного связующего при воздействии на ПКМ щелочных сред, что хорошо описано в работе [8]. Негативное воздействие раствора серной кислоты и сжимающего напряжения привело к образованию разветвленных макротрещин в структуре композиционного кольца (рисунок 3, в). Излом волокон армирующего материала является преимущественным характером разрушения ПКМ.

ОБСУЖДЕНИЕ

Можно отметить, что несостаренные образцы обоих типов колец № 1 (рисунок 2, а) и № 2 (рисунок 3, а) после механических испытаний на сжатие имеют схожий характер разрушения, характеризующийся минимальным количеством макротрещин и

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

отсутствием выраженных пустот. Однако при их сравнении можно отметить, что образец № 1 имеет более выраженную картину поражения, подтверждающуюся изломом волокон и большей шириной трещин. На это также указывает, что прочностные характеристики, полученные в результате механического сжатия у образца № 2, больше, чем у образца № 1.

К действию щелочной среды (NaOH) более устойчив образец № 1 (рисунок 2, б) в отличие от образца № 2 (рисунок 3, б). Область разрушения у последнего характеризуется появлением большего количества дефектов, таких как расслоение, макротрещины, пустоты и разрывы волокон армирующего материала (ровинга). Эти замечания также согласуются с данными таблицы 1, где коэффициент химической стойкости у образца № 1 составляет 71,16 %, а у № 2 – 13,29 %. Это можно объяснить тем, что в щелочной среде большей химической стойкостью обладают композиционные материалы, имеющие в своём составе аминный отвердитель, о чем упоминается в исследовании [9].

Напротив, можно подчеркнуть, что к действию H_2SO_4 стойким оказался второй тип образцов – № 2. Это подтверждается тем, что образцы № 1 имеют практически полностью разрушенную структуру (рисунок 2, в, г) после воздействия данной испытательной среды, в то время, как у образцов № 2 замечается небольшое количество структурных дефектов (рисунок 3, в). Согласно данным таблицы 1, образцы № 2 имеют больший коэффициент химстойкости (73,80 %) по сравнению с образцами № 1 (19,56 %). Таким образом, также подтверждается, что ПКМ на основе ангидридных отвердителей проявляют стойкость к действию кислот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью оптической микроскопии были выявлены механизмы разрушения исходных, предварительно ускоренно состаренных в щелочи и кислоте образцов базальтовых композитных колец на основе аминных и ангидридных отвердителей. Данные оптической микроскопии совпадают и дополняют сведения по прочностным характеристикам ПКМ. Природа отвердителя определяет стойкость полимерной матрицы к той или иной среде воздействия.

Дальнейшие исследования химической стойкости и режимов разрушения ПКМ представляют большой интерес и практическую значимость в проблеме использования композиционных изделий и конструкций в среде воздействия химически агрессивных сред.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают эффективность применения аминных отвердителей при производстве ПКМ для щелочных сред, а ангидридных – для кислых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русских Г.И. Полимерные композиты. Технология достижения качества : монография / Г.И. Русских, В.В. Са-

мойленко ; под ред. Г.И. Русских. Бийск : ПОАК ОООП «Общероссийское литературное сообщество», 2022. 294 с.

2. Yue Yuan, Wang Wen-wei, Zhang Lei, Liang Liang, Zhao Qiang. (2024). Effect of sand coating on durability and micro-structural deterioration of GFRP rebar under alkaline environment attack. *Construction and Building Materials*, 413. 134900. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134900.

3. Tu J., Xie H. & Gao K. (2020). Prediction of the Long-Term Performance and Durability of GFRP Bars under the Combined Effect of a Sustained Load and Severe Environments. *Materials*, 13(10), 2341. <https://doi.org/10.3390/ma13102341>.

4. Guo F., Al-Saadi S., Singh Raman R.K. & Zhao X.L. (2018). Durability of fiber reinforced polymer (FRP) in simulated seawater sea sand concrete (SWSSC) environment. *Corrosion Science*, 141, 1–13. doi: 10.1016/j.corsci.2018.06.

5. ГОСТ 12020–2018 (ISO 175:2010) Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред. М. : Стандартинформ, 2018. 21 с.

6. Akderya T., Horzum N. & Baba B.O. Effect of acidic environment on absorptive, morphological, mechanical, structural, and thermal properties of glass-carbon/epoxy-based hybrid composites. *J Polym Res* 31, 27 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10965-023-03860-x>.

7. Сакошев Е.Г., Калистру В.А., Блазнов А.Н., Савин И.И., Сакошев З.Г., Медведев П.А. Исследование химической стойкости стекло- и базальтопластиков на различных связующих // *Фундаментальное и прикладное материаловедение : труды XXII Международной научной школы-конференции, 29–31 октября 2025 года / под ред. В.Б. Маркина ; Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2025. С. 75–81. ; ил. URL: https://journal.altstu.ru/konf_2025/2025_1/149/.*

8. Wen S., Cao M. Review on degradation behavior of fiber-reinforced polymer bars in marine environments. *J Mater Sci* 58, 9861–9893. (2023). <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08667-1>.

9. Kocaman S., Ahmetli G. (2016). A study of coating properties of biobased modified epoxy resin with different hardeners. *Progress in Organic Coatings*, 97, 53–64. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2016.03.025.

Информация об авторах

Е. Г. Сакошев – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории Материаловедения минерального сырья ИПХЭТ СО РАН.

А. Н. Блазнов – доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Материаловедения минерального сырья ИПХЭТ СО РАН.

Н. В. Бычин – старший научный сотрудник лаборатории Материаловедения минерального сырья ИПХЭТ СО РАН.

Information about the authors

E.G. Sakoshev - Ph.D. student, Junior Research Scientist at the Laboratory of Materials Science and Mineral Raw Materials, IPCET SB RAS.

A.N. Blaznov - Doctor of Technical Sciences, Chief of the Laboratory of Materials Science and Mineral Raw Materials, IPCET SB RAS.

N.V. Bychin - Senior Research Scientist at the Laboratory of Materials Science and Mineral Raw Materials, IPCET SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mart 2026.