



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 678.09

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.025



ХИМИЧЕСКИЙ РЕЦИКЛИНГ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ МАТРИЦЕЙ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ЭТАНОЛА

Проценко Александр Евгеньевич¹, Петров Виктор Викторович²,
Проценко Александра Николаевна³, Люхо Илья Андреевич⁴

^{1, 2, 3, 4} Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

¹ protsenko.ae@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5238-6388>

² petrovpng@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-3476-8769>

³ protsenko.chem@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0235-2021>

⁴ keltani@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8390-531X>

Аннотация. Вопросы рециклинга термореактивных полимерных материалов являются актуальными во всем мире. Данные материалы стабильны длительное время при воздействии внешних факторов, что приводит к образованию устойчивых техногенных отходов. В данной работе рассматривается сольволиз полимерных композиционных материалов в среде этанола, в частности, рассматриваются стеклопластики на основе эпоксидного и эпоксивинилэфирного связующих. Установлено, что эпоксивинилэфирную матрицу не удастся разрушить полностью при 280 °С. Сольволиз в сверхкритическом этаноле эпоксидного пластика при 280 °С способствовал деструкции полимерной матрицы и освобождению стеклянных волокон. При более низких температурах происходит набухание матрицы с последующей частичной деструкцией. По данным SEM, установлено, что на поверхности регенерированных волокон имеется остаточное полимерное покрытие, толщина которого зависит от режима сольволиза. Диаметр волокна, извлеченного из эпоксивинилэфирного пластика, на 1–1,5 мкм больше исходного. При этом волокна из эпоксидного пластика при температуре обработки 280 °С всего лишь на 100–300 нм больше в диаметре первичных волокон. Поверхность волокон гладкая без следов коррозии. Исследование сольволизной жидкости, полученной в результате алкоголиза эпоксидного стеклопластика, методом ГХМС показало, что большая часть представлена соединениями фенола и олигомеров на их основе. При этом полученные продукты можно использовать повторно в органическом синтезе.

Ключевые слова: полимерные композитные материалы, стеклопластик, рециклинг, сольволиз, сверхкритическое состояние, деструкция.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00246.

Для цитирования: Химический рециклинг стеклопластиков с термореактивной матрицей в среде сверхкритического этанола / А. Е. Проценко [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 193–200. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.025. EDN: <https://elibrary.ru/QFXUVR>.

Original article

CHEMICAL RECYCLING OF FIBERGLASS REINFORCED THERMOSETTING PLASTICS USING SUPERCRITICAL ETHANOL

Alexander E. Protsenko¹, Victor V. Petrov², Alexandra N. Protsenko³,
Ilya A. Lyukho⁴

^{1, 2, 3, 4} Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

¹ protsenko.ae@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5238-6388>

© Проценко А. Е., Петров В. В., Проценко А. Н., Люхо И. А., 2023

² petrovpng@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-3476-8769>

³ protsenko.chem@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0235-2021>

⁴ keltani@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8390-531X>

Abstract. *Issues of thermosetting polymer materials recycling have become important in the modern society. These materials are very stable, which leads to the formation of sustainable man-made waste. In this paper, the solvolysis of polymer composite materials in ethanol is considered. As the polymer composite used glass-reinforced plastics based on epoxy and epoxy vinyl ester binders. It has been established that the epoxy vinyl ester matrix can not be completely destroyed even at 280 °C. Solvolysis in supercritical ethanol of epoxy plastic at 280°C contributed to the destruction of the polymer matrix and the release of glass fibers. At lower temperatures, the matrix swells and only partial destruction were observed. According to SEM data, it was found that there is a residual polymer coating on the surface of the regenerated fibers, the thickness of which depends on the solvolysis mode. The diameter of the fiber extracted from epoxy vinyl ester plastic is 1-1.5 μm larger than the original one. At the same time, fibers from epoxy plastic at a processing temperature of 280 °C are only 100-300 nm larger in diameter than primary fibers. The surface of the fibers is smooth without traces of corrosion. The study of the solvolysis liquid obtained as a result of the alcoholysis of epoxy fiberglass by the GCMS method showed that most of it is represented by phenol compounds and oligomers based on them. In this case, the obtained products can be reused in organic synthesis.*

Keywords: *polymer composite materials, fiberglass reinforced plastic, recycling, solvolysis, supercritical state, destruction.*

Acknowledgements: *The study was financially supported by the Russian Science Foundation within the framework of the scientific project No. 21-79-00246.*

For citation: Protsenko, A.E., Petrov, V.V., Protsenko, A.N. & Lyukho, I.A. (2023). Chemical recycling of fiberglass reinforced thermosetting plastics using supercritical ethanol. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 193-200. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.025. EDN: <https://elibrary.ru/QFXUVR>.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы рециклинга термореактивных пластмасс являются актуальными в современном обществе. Данные материалы отличаются высокой стабильностью химических структур, и даже после окончания жизненного цикла изделия не разрушаются длительное время, что приводит к образованию устойчивых техногенных отходов [1–3].

В тоже время термореактопласты и композиты на их основе могут являться ценным источником сырьевых компонентов для органического синтеза.

В настоящее время принято выделять три основных метода рециклинга: механический, термический и химический [4]. В результате механической обработки происходит разрушение полимерной матрицы и армирующего наполнителя. При этом термореактопласт, лежащий в основе композита, остается [5]. Вследствие чего данный метод, несмотря на аппаратную простоту, нельзя отнести к эффективным. Термические методы рециклинга также просты, для их обеспечения достаточно печи с возможностью создания защитной атмосферы [6]. Отличительной характеристикой процесса являются высокие температуры и большое количество выделяющихся летучих продуктов в результате термодеструкции полимеров. Во многих работах,

направленных на исследование термического рециклинга, отмечается существенное снижение прочностных свойств армирующего наполнителя, особенно стекловолокна [7, 8]. Химический метод является наиболее перспективным ввиду того, что позволяет одновременно выделить армирующий наполнитель практически в исходном состоянии и продукты деструкции полимерной матрицы [9–11]. В работе [12] представлены данные о возможности применения сверхкритических спиртов для рециклинга углеродного волокна при температуре 300–400 °C. Использование высоких температур способствует интенсификации алкоголиза, однако, в отличие от углеродных волокон, стеклянные более восприимчивы к высоким температурам. Вопросы рециклинга стеклянных наполнителей изучены недостаточно.

Данная работа посвящена актуальным вопросам рециклинга полимерных композиционных материалов, в частности, рассматриваются стеклопластики на основе эпоксидного и эпоксивинилэфирного связующих.

МЕТОДЫ

Объектом исследования выступал полимерный композиционный материал (EP-62004) на основе полотняной стеклоткани 1250-T30-290 (Umatex) и двухкомпонентного эпоксидного связующего SR8100/SD8824

ХИМИЧЕСКИЙ РЕЦИКЛИНГ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ МАТРИЦЕЙ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ЭТАНОЛА

(Sicomin). Второй стеклопластик (Der-62004) изготавливался на основе той же ткани и связующего Derakane Momentum 411-350 (Ashland). Данный материал и его аналоги широко применяются в различных отраслях машиностроения. Девятислойные пластики были изготовлены методом вакуумной инфузии.

Сольволиз проводился в лабораторном фторопластовом реакторе объемом 25 мл. Фторопластовый вкладыш с плотно прилегающей герметичной крышкой помещался в металлическую колбу и плотно закрывался. В реактор помещался образец композита массой 2 г и этанола концентрацией 90 масс. %. Сольволиз продолжался до достижения полного разделения матрицы и наполнителя в диапазоне температур до 250 °С.

Термоанализ образцов выполнялся на приборе синхронного термического анализа STA 409 PC Luxx (Netzsch Geraetebau GmbH). В процессе эксперимента проводилась регистрация ТГ и ДСК данных. Анализ выполнялся в тиглях из корундовой керамики. Нагрев осуществлялся со скоростью 10 К/мин в воздушной атмосфере.

Кинетика набухания образцов стеклопластиков в результате обработки в сверхкритическом этаноле оценивалась по изменению массы по формуле:

$$\Delta m = \frac{m_t - m_0}{m_0} 100\%, \quad (1)$$

где Δm – изменение массы образцов, %;

m_0 – начальная масса образца, г;

m_t – масса образца после сольволиза, г.

Взвешивание проводилось на аналитических весах с точностью 0,001 г.

Структурные исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, оснащенный электронной пушкой с вольфрамовым катодом. Измерения проводились при ускоряющем напряжении 5 кВ с использованием детектора вторичных электронов (SE).

Хромато-масс-спектрометрия. Количественный и качественный состав продуктов деструкции полимерной матрицы проводился на хромато-масс-спектрометре Shimadzu GCMS-QP 2010 Ultra. Для анализа использовалась хроматографическая колонка Rtx-5MS длиной 30 м. Температурный режим нагрева печи: от 30 °С до 300 °С со скоростью 5 °С/мин с последующей выдержкой в течение 25 минут. Температура инжектора 280 °С. Объем пробы 0,2 мкл вводился автосемплером АОС -20i, деление потока не осуществлялось. В качестве газа носителя использовался гелий 6.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальное исследование сольволиза полимерных композитов проводилось в герметичном реакторе. Реактор помещался в печь, разогретую до температуры процесса

и выдерживался необходимое время, после чего охлаждался в токе холодной воды.

В результате были получены волокна стеклоткани различной чистоты и сольволизная жидкость, представляющая собой продукты распада полимерной матрицы в этиловом спирте. Параметры сольволиза представлены в таблицах 1,2.

Таблица 1 – Параметры сольволиза EP-62004

Table 1 – Parameters of solvolysis EP-62004

№	Температура, К	Время выдержки, ч	Масса образца, г
	250	0	12,2
1		1	14,5
2		2	14,8
3		4	15,1
		7	15,5
		10	13,3
	280	0	11,8
		1	14,6
		2	15,3
		4	12,2

Таблица 2 – Параметры сольволиза Der-62004

Table 2 – Parameters of solvolysis Der-62004

№	Температура, К	Время выдержки, ч	Масса образца, г
	250	0	11,4
		1	13,9
		4	14,2
		7	15,0
		10	15,1
		12	15,0
	280	0	11,8
		1,5	14,6
		3	15,5
		4	15,2
		5	12,9

Сольволиз в сверхкритическом этаноле эпоксидного пластика при 280 °С способствовал деструкции полимерной матрицы и освобождению стеклянных волокон. Кинетика изменения массы образцов стеклопластика в процессе сольволиза представлена на рисунках 1, 2

Эпоксивинилэфирная матрица достигает максимума набухания в 31,5 % при обработке в среде этанола при 250 °С через 7 часов. Дальнейшая экспозиция материала приводит к незначительному росту степени набухания на 1 % по достижении 10 часов. Выход кривой на плато свидетельствует об неэффективности данного режима для деструкции эпоксивинилэфирной матрицы. Максимальная степень набухания эпоксидного стеклопластика составила 30 % при времени обработки 7 часов. При более длительной обработке в данных условиях масса образцов снижается, что свидетельствует о начале процессов деструкции эпоксидной матрицы и растворении продуктов ее распада в этиловом спирте.

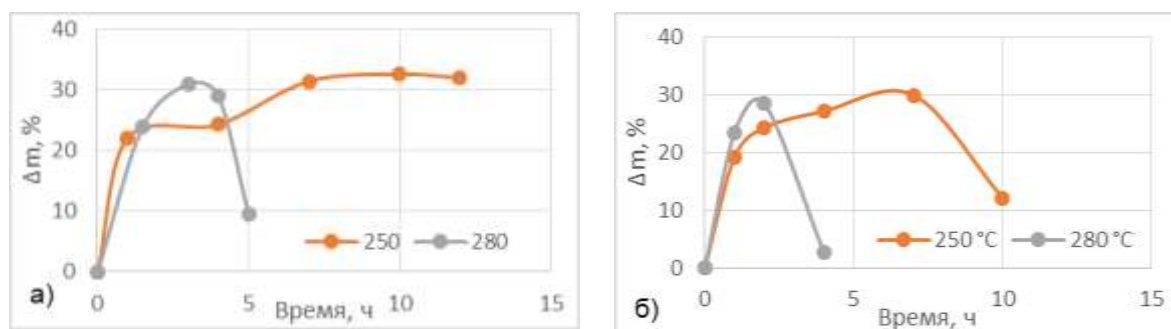


Рисунок 1 – Изменение массы образцов стеклопластика (Δm) от температуры и времени сольволиза: а) Der-62004; б) EP-62004

Fig. 1 – Change in the mass of fiberglass samples (Δm) on temperature and time of solvolysis: а) Der-62004, б) EP-62004

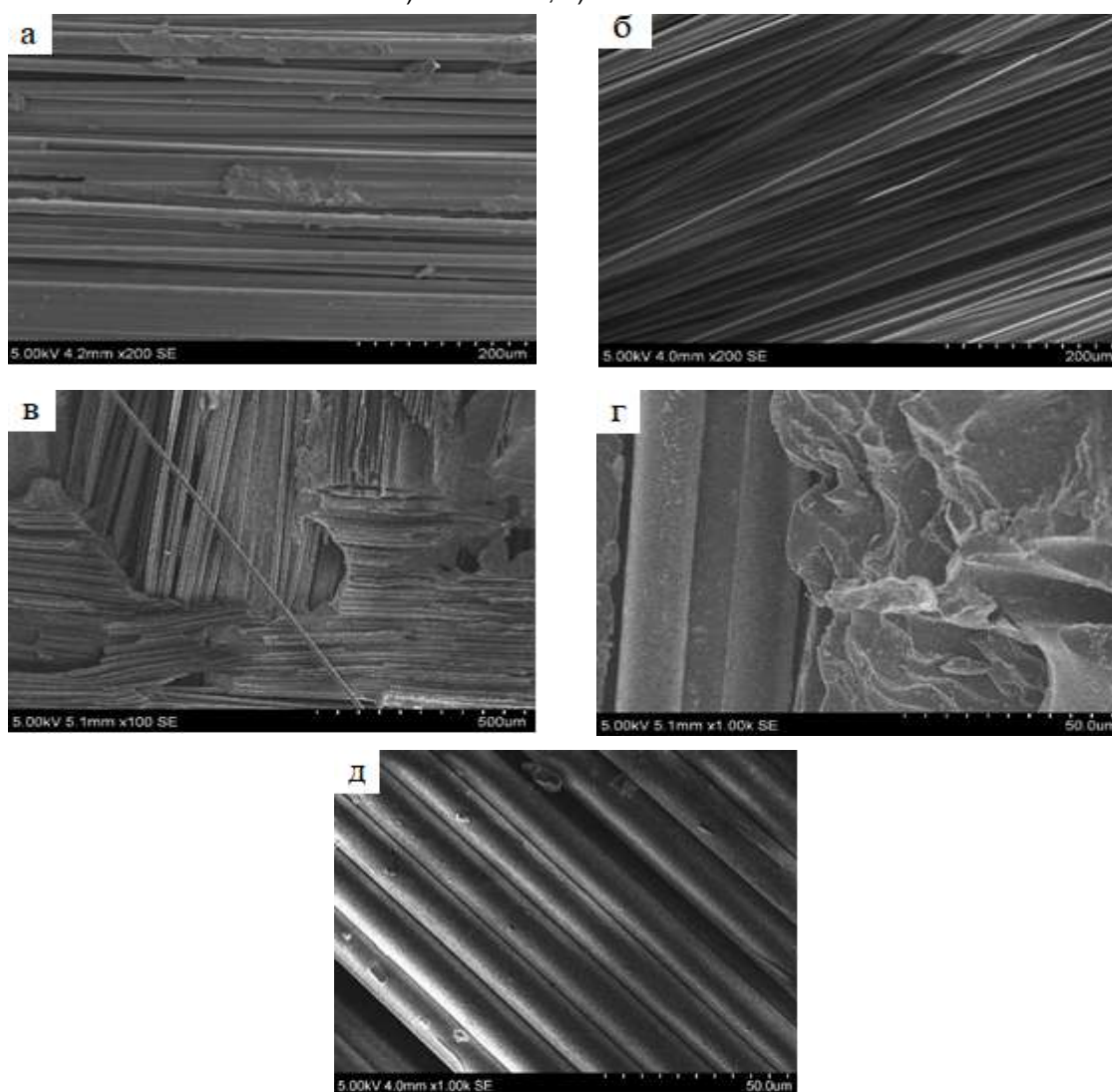


Рисунок 2 – Микроструктуры стекловолокон, полученных сольволизом композитов в сверхкритическом этаноле: EP62004: а) 250 °C, 10 ч, x200; б) 280 °C, 4 ч, x200; Der62004 280 °C, 5 ч; в) x100; г) x1k; д) первичные необработанные волокна x1k

Fig. 2 – Microstructures of glass fibers obtained by solvolysis of composites in supercritical ethanol: EP62004 а) 250 °C, 10 h, x200, б) 280 °C, 4 h, x200; Der62004 280 °C, 5 h с) x100; d) x1k e) virgin raw fibers x1k

ХИМИЧЕСКИЙ РЕЦИКЛИНГ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ МАТРИЦЕЙ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ЭТАНОЛА

Обработка стеклопластиков при 280 °С сопровождается резким увеличением массы образцов в связи с набуханием. Снижение массы образцов после максимума на кривых изменениях массы свидетельствует о значительном разрушении полимерных матриц.

При извлечении из реактора образцы композитов Deg-62004, обработанных при 250 °С, расслаиваются вдоль слоев стеклоткани, но на поверхности волокон остается нерастворимый органический компонент в большом количестве, извлечение индивидуальных волокон затруднено.

На основании данных, полученных со снимков SEM, следует, что в зависимости от типа материала и используемого режима сольволиза диаметры элементарных волокон стеклоткани отличаются. В отличие от случаев применения высокотемпературных методов деструкции полимерных матриц [7], где стеклянные волокна утолщаются в 1,2 раза, что, по-видимому, вызвано процессами релаксации при температурах свыше 400 °С. В данном случае диаметр волокна, извлечен-

ного из эпоксивинилэфирного пластика, на 1–1,5 мкм (что составляет 6,7 %) больше исходного. Данный факт объясняется наличием на поверхности волокна матричного покрытия, которое полностью не удалилось в процессе сольволиза. При этом волокна из эпоксидного пластика при температуре обработки 280 °С всего лишь на 100–300 нм больше в диаметре первичных волокон.

На волокнах, регенерированных из стеклопластика EP-62004, присутствуют в небольшом количестве частицы диаметром до 2 мкм, имеющие органическое происхождение. Поверхность волокон гладкая, без следов коррозии.

На сегментах волокон ткани, обработанной при 280 °С, находившейся в толщине образца, наблюдаются куски эпоксивинилэфирной матрицы размерами свыше 500 мкм (рисунок 2, б, в). На волокнах с пограничных слоев размеры частиц значительно меньше и не превышают 2 мкм. Данные наблюдения также подтверждаются результатами синхронного термического анализа (рисунок 3).

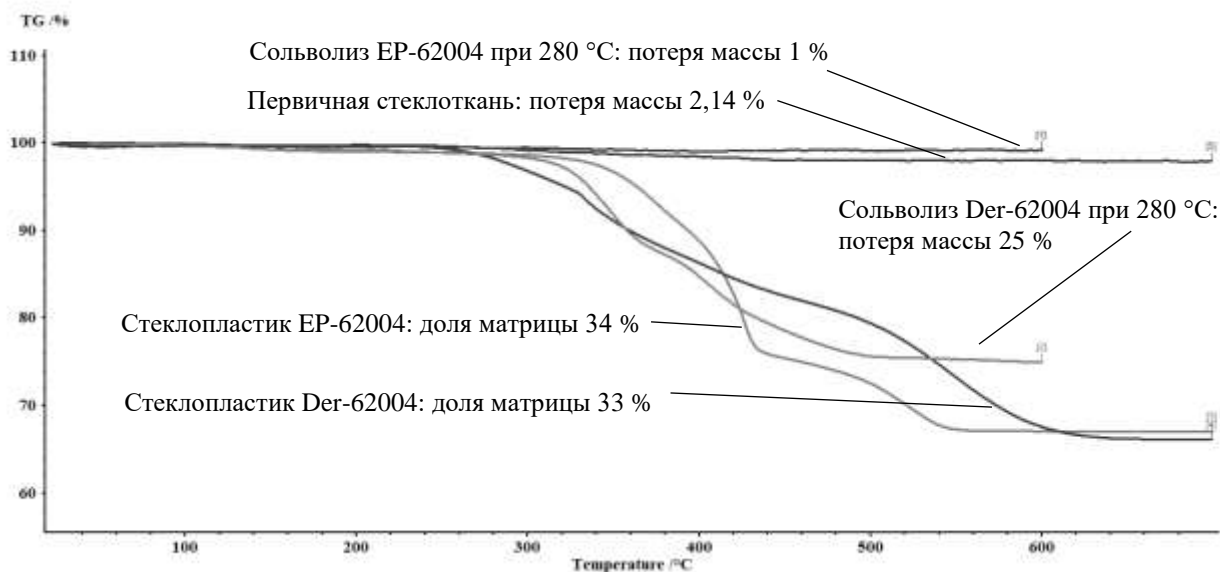


Рисунок 3 – Термогравиметрические кривые образцов стеклоткани композитов

Fig. 3 – Thermogravimetric curves of samples of fiberglass composites

По данным термического анализа, образцы эпоксидного и эпоксивинилэфирного композита на основе стеклоткани 1250-Т30-290 (Umatex) содержат 33 % остатков матрицы. Первичное стекловолокно на своей поверхности содержит 2,14 % компонентов, которые удаляются при термической обработке и являются аппретом. Волокна, полученные из эпоксидного пластика при сольволизе и температуре 280 °С в течение 4 часов, содержат

0,96 % органической составляющей, что свидетельствует о практически полном удалении не только матрицы, но и аппрета. Образцы регенерированных волокон, полученных при сольволизе эпоксивинилэфирного стеклопластика в среде сверхкритического этанола при 280 °С в течение 5 часов, содержат 24,5 % остатков матрицы. Данный факт свидетельствует о недостаточной эффективности процесса для данного материала.

Исследование методом ГХМС состава жидкости после сольволиза эпоксипластика показало наличие следующих основных компонентов, представленных в таблице 4.

На основании имеющихся данных о составе эпоксидного связующего SR8100 и отвердителя SD8824 представлена возможная структура отвержденного полимера (рисунок 4). Также предложена схема протекания деструкции эпоксидной матрицы с указанием вероятных участков разрыва связей. Одним из основных продуктов деструкции является 3-{4-[2-(4-гидроксифенил)пропан-2-ил]фенокси}пропан-1,2-диол, являющимся элементарным звеном полимерной цепи на основе бисфенола-А. Данная молекула также может подвергаться разрушению с образованием более простых низкомолекулярных веществ. Схема процесса представлена на рисунках 4, 5

Таблица 4 – Состав сольволизной жидкости
Table 4 – The composition of the solvolysisfluid

№	Компонент	Концентрация, %
1	Бисфенол F	27
2	Ацетон	20
3	Производные метилфенилового эфира	16
4	Бисфенол А	7
5	Производные фенола	6,7
6	3-{4-[2-(4-гидроксифенил)пропан-2-ил]фенокси}пропан-1,2-диол	6
7	1-этил-4-пиперидон	5,6
8	3-метил-4-пентен-1-ол	1,7
9	триэтиламин	1,3
10	1-(этоксиметил)-3-метилбензол	1
11	Тетраэтиленэтилдиамин	0,7
12	диэтиламин	0,5
13	Продукты взаимодействия этанола и ацетона	6,5

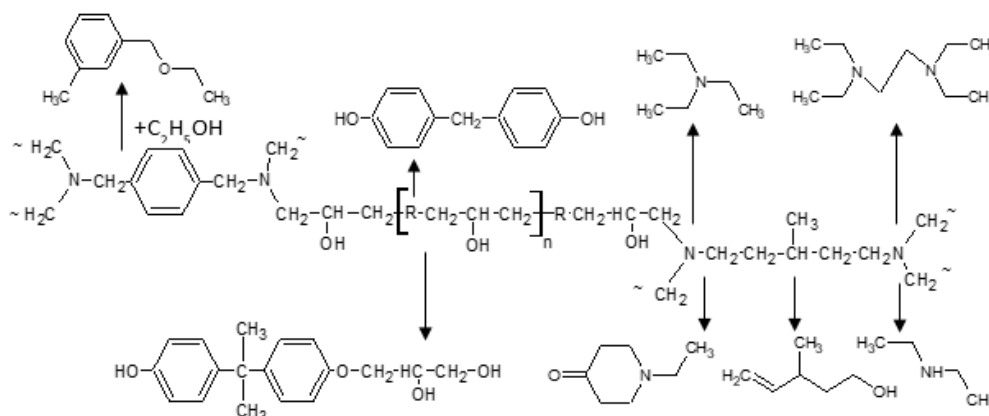


Рисунок 4 – Схема деструкции эпоксидной матрицы пластика EP-62004 в условиях сольволиза

Fig. 4 - Scheme of the destruction of the epoxy matrix of EP-62004 plastic under solvolysis conditions

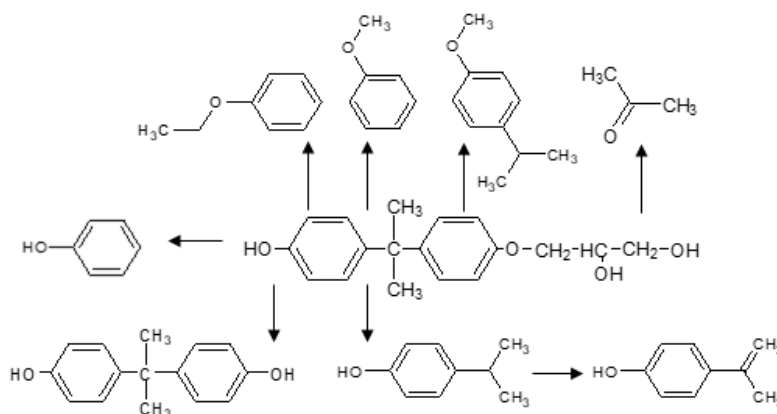


Рисунок 5 – Схема деструкции эпоксидной олигомера пластика EP-62004 в условиях сольволиза

Fig. 5 – Scheme of the destruction of the EP-62004 epoxy plastic oligomer under solvolysis conditions

ХИМИЧЕСКИЙ РЕЦИКЛИНГ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ МАТРИЦЕЙ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ЭТАНОЛА

Полученные при сольволизе химические соединения возможно использовать в органическом синтезе. В частности, бисфенол является основным продуктом для синтеза эпоксидных смол, фенол находит применение в производстве красителей и фенолформальдегидных олигомеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках данной работы проведена сравнительная оценка эффективности сверхкритического сольволиза в среде этанола эпоксидного и эпоксивинилэфирного композитов. Установлено, что в среде этанола до 280 °С успешно протекают процессы алкохолиза в эпоксидной матрице. В результате получены регенерированные волокна, которые, как показано в ряде работ [11], можно использовать повторно. Полученные сольволизные жидкости преимущественно состоят из низкомолекулярных продуктов фенольного ряда, полученных в результате распада олигомера. Полученные вещества имеют широкое применение в химической промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kablov, E.N., Startsev, O.V., Krotov, A.S. & Kirillov, V.N. (2012). Climatic aging of composite aviation materials: III. Significant aging factors. *Russian Metallurgy*, 2012(4), 323–329. <https://doi.org/10.1134/s0036029512040040>.
2. Chen J., Li Z., Zhu S., Li Z. & Kong Y. (2013, August 1). Prediction of Long-Term Properties of Fiberglass Pipe Based on the Shift Factors Method. *Advanced Materials Research; Trans Tech Publications*.
3. André A., Kullberg J., Nygren D.R., Mattsson C., Nedev G. & Haghani R. (2020). Re-use of wind turbine blade for construction and infrastructure applications. *IOP Conference Series*, 942(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/942/1/012015>.
4. Pimenta S. & Pinho S.T. (2011). Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management*, 31(2), 378–392. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.019>.
5. Петров А.В., Дориомедов М.С., Скрипачев С.Ю. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды Виам*. 2015. С. 62–73. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-8-9-9>.
6. Meyer L.O., Schulte K. & Grove-Nielsen E. (2009). CFRP-Recycling Following a Pyrolysis Route: Process Optimization and Potentials. *Journal of Composite Materials*, 43(9), 1121–1132. <https://doi.org/10.1177/0021998308097737>.
7. Protsenko A.E., Pimenova E. & Petrov V.V. (2020). Recycling of glass fibers sheets from thermoset reinforced plastic using thermolysis method. *IOP Conference Series*, 734(1), 012185. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/734/1/012185>.

8. Ginder R.S. & Ozcan S. (2019). Recycling of Commercial E-glass Reinforced Thermoset Composites via Two Temperature Step Pyrolysis to Improve Recovered Fiber Tensile Strength and Failure Strain. OSTI OAI (U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information). <https://doi.org/10.3390/recycling4020024>.

9. Okajima I. & Sako T. (2017). Recycling of carbon fiber-reinforced plastic using supercritical and subcritical fluids. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(1), 15–20. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0412-910>.

11. Protsenko A.E. & Petrov V.V. (2022). Recycling of Fiberglass Fillers Obtained from Polymer Composites Based on an Epoxy Vinyl Ester Binder. *Mechanics of Composite Materials*, 58(4), 537–544. <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10048-9>.

12. Piñero-Hernanz R., García-Serna J., Dodds C.A., Hyde J.R., Poliakov M., Cocero M.J., Kingman S., Pickering S.J. & Lester E. (2008). Chemical recycling of carbon fibre composites using alcohols under subcritical and supercritical conditions. *Journal of Supercritical Fluids*, 46(1), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.02.008>.

Информация об авторах

А. Е. Проценко – кандидат технических наук, доцент кафедры «ХиХТ» Комсомольского-на-Амуре государственного университета.

В. В. Петров – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник УНИД Комсомольского-на-Амуре государственного университета.

А. Н. Проценко – кандидат химических наук, доцент кафедры «ХиХТ» Комсомольского-на-Амуре государственного университета.

И. А. Люхо – лаборант-исследователь УНИД Комсомольского-на-Амуре государственного университета

REFERENCES

1. Kablov, E.N., Startsev, O.V., Krotov, A.S. & Kirillov, V.N. (2012). Climatic aging of composite aviation materials: III. Significant aging factors. *Russian Metallurgy*, 2012(4), 323–329. <https://doi.org/10.1134/s0036029512040040>.
2. Chen, J., Li, Z., Zhu, S., Li, Z. & Kong, Y. (2013, August 1). Prediction of Long-Term Properties of Fiberglass Pipe Based on the Shift Factors Method. *Advanced Materials Research; Trans Tech Publications*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.748.411>.
3. André, A., Kullberg, J., Nygren, D.R., Mattsson, C., Nedev, G. & Haghani, R. (2020). Re-use of wind turbine blade for construction and infrastructure applications. *IOP Conference Series*, 942(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/942/1/012015>.

4. Pimenta, S. & Pinho, S.T. (2011). Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management*, 31(2), 378-392. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.019>.
5. Petrov, A.D. & Skripachev, S.Y. (2015). Recycling technologies of polymer composite materials (review). *Trudy VIAM*, 0(8), 9. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-8-9-9>.
6. Meyer, L.O., Schulte, K. & Grove-Nielsen, E. (2009). CFRP-Recycling Following a Pyrolysis Route: Process Optimization and Potentials. *Journal of Composite Materials*, 43(9), 1121-1132. <https://doi.org/10.1177/0021998308097737>.
7. Protsenko, A.E., Pimenova, E. & Petrov, V.V. (2020). Recycling of glass fibers sheets from thermoset reinforced plastic using thermolysis method. *IOP Conference Series*, 734(1), 012185. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/734/1/012185>.
8. Ginder, R.S. & Ozcan, S. (2019). Recycling of Commercial E-glass Reinforced Thermoset Composites via Two Temperature Step Pyrolysis to Improve Recovered Fiber Tensile Strength and Failure Strain. OSTI OAI (U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information). <https://doi.org/10.3390/recycling4020024>.
9. Okajima, I. & Sako, T. (2017). Recycling of carbon fiber-reinforced plastic using supercritical and subcritical fluids. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(1), 15-20. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0412-910>.
11. Protsenko, A.E. & Petrov, V.V. (2022). Recycling of Fiberglass Fillers Obtained from Polymer Composites Based on an Epoxy Vinyl Ester Binder. *Mechanics of Composite Materials*, 58(4), 537-544. <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10048-9>.
12. Piñero-Hernanz, R., García-Serna, J., Dodds, C.A., Hyde, J.R., Poliakov, M., Cocero, M.J., Kingman, S., Pickering, S.J. & Lester, E. (2008). Chemical recycling of carbon fibre composites using alcohols under subcritical and supercritical conditions. *Journal of Supercritical Fluids*, 46(1), 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.02.008>.

Information about the authors

A.E. Protsenko - Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of "ChiCT" Komsomolsk-on-Amur State University.

V.V. Petrov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of UNID Komsomolsk-on-Amur State University.

A.N. Protsenko - Candidate of Chemical Sciences Associate Professor of the Department of "ChiCT" Komsomolsk-on-Amur State University.

I.A. Lyukho - laboratory researcher UNID Komsomolsk-on-Amur State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12.01.2023; одобрена после рецензирования 13.05.2023; принята к публикации 11.06.2023.

The article was received by the editorial board on 12 Jan 2022; approved after editing on 13 May 2023; accepted for publication on 11 June 2023.