



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК678.09

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.037



ХИМИЧЕСКИЙ РЕЦИКЛИНГ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ МАТРИЦЕЙ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ЭТАНОЛА В ПРИСУТСТВИИ NaOH

Александр Евгеньевич Проценко¹, Илья Андреевич Люхо²

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

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

² keltani@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8390-531X>

Аннотация. В последние десятилетия вопросы рециклинга полимерных композитных материалов, особенно стеклопластиков, приобретают все большую актуальность в связи с возрастающим количеством отходов и устойчивостью данных материалов к воздействию окружающей среды. Композиты на основе термореактивных смол являются одними из наиболее сложных для переработки, что связано с их высокой термостойкостью и химической стабильностью. В работе рассматривается процесс рециклинга стеклопластиков с эпоксидной и эпоксивинилэфирной матрицами методом сольволиза в среде сверхкритического этанола в присутствии NaOH. С использованием методов термического анализа установлены зависимости степени деструкции матриц от времени и концентрации едкого натра. Установлено, что наилучшие результаты деструкции эпоксидной и эпоксивинилэфирной матриц достигаются при концентрации NaOH 0,3 г на 1 г композита при температуре 250 °С и времени обработки 5 часов. По данным термоанализа, установлено, что эпоксивинилэфирная матрица труднее поддается деструкции в рассматриваемых условиях. Восстановленные стеклянные наполнители были использованы для изготовления дисперсноармированных композитов, в которых содержание армирующего наполнителя варьировалось от 5 % до 60 %. Лучшие прочностные свойства были получены у композитов с содержанием восстановленных стеклянных наполнителей 30 м. %.

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

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01137.

Для цитирования: Проценко А. Е., Люхо И. А. Химический рециклинг стеклопластиков с термореактивной матрицей в среде сверхкритического этанола в присутствии NaOH // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 212–217. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.037. EDN: <https://elibrary.ru/RVJLZT>.

Original article

CHEMICAL RECYCLING OF FIBERGLASS REINFORCED THERMOSETTING PLASTICS USING SUPERCRITICAL ETHANOL IN PRESENCE OF NaOH

Alexander E. Protsenko¹, Ilya A. Lyukho²

^{1, 2} Komsomolsky-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

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

² keltani@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8390-531X>

Abstract. In recent decades, the issues of recycling polymer composite materials, especially fiberglass, have gained increasing relevance due to the growing amount of waste and the environmental resistance of these materials. Thermosetting resin-based composites are among the most challenging to recycle because of their high thermal resistance and chemical stability. This study examines the recycling process of fiberglass composites with epoxy and epoxy vinyl ester matrices using solvolysis in a supercritical ethanol environment in the presence of NaOH. Using thermal analysis methods, the dependence of the matrix degradation degree on the time and concentration of caustic soda was established. The optimal conditions for the degradation of epoxy and epoxy vinyl ester matrices were found to be an NaOH concentration of 0,3 g per 1 g of composite, at a temperature of 250 °C, with a processing time of 5 hours. Thermal analysis indicated that the epoxy vinyl ester matrix is more resistant to degradation under the studied conditions. The recovered glass fillers were used to produce short fiber-reinforced composites, with reinforcement content varying from 5 % to 60 %. The best mechanical properties were achieved in composites containing 30 wt. % of the recovered glass fillers.

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. 23-79-01137.

© Проценко А. Е., Люхо И. А., 2025

ХИМИЧЕСКИЙ РЕЦИКЛИНГ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ МАТРИЦЕЙ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ЭТАНОЛА В ПРИСУТСТВИИ NaOH

For citation: Protsenko, A.E., Lyukho, I.A. (2025). Chemical recycling of fiberglass reinforced thermosetting plastics using supercritical ethanol in presence of NaOH. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 212-217. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.03.037. EDN: <https://elibrary.ru/RVJLZT>.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) – наиболее перспективный материал, позволяющий возводить прочные и долговечные конструкции, устойчивые к воздействиям внешних факторов. Одним из преимуществ таких материалов является инертность к воздействию агрессивных сред и малый вес. Однако, как и другие материалы, они подвержены физическому износу, повреждениям и со временем утрачивают свои первоначальные свойства и подлежат замене. По данным литературных источников, жизненный цикл изделий из ПКМ может достигать 50 лет [1]. Отходы также возникают при производстве и обработке ПКМ. Таким образом, возникает необходимость переработки нарастающей массы высокоустойчивого отработанного материала, в основе которого находится полимерная термореактивная матрица. Естественная деградация таких материалов может достигать сотни лет [2].

На сегодняшний день для утилизации изделий из полимерных композитов распространение получили механические методы [3] и пиролиз [4]. При этом наиболее перспективными по эффективности и экологической безопасности являются химические методы.

Целью данного исследования является изучение процесса деструкции стеклопластиков методом сольволиза с извлечением стекловолокон для их последующего вторичного использования.

МЕТОДЫ

Объектом исследования выступали образцы стеклопластиков, изготовленные из 9 слоев стеклоткани марки 1250-T30-290 (Umatex), выложенных с углом армирования 0°. Для пропитки использовалось в одном случае эпоксивинилэфирное связующее Derakane Momentum 411-350 с отвердителем Butanox M50 (Ashland), в другом случае – двухкомпонентное эпоксидное связующее Sicomin SR8100/SD8824. Пропитка осуществлялась методом вакуумной инфузии.

Деструкция полимерной матрицы осуществлялась сольволизом в 90 % спиртовом растворе этанола. С целью интенсификации реакции использовался гидроксид натрия (NaOH), концентрация которого варьировалась от 0 до 0,4 г на 1 г композита [5].

Реактопласт помещался в герметичный реактор, состоящий из инертной фторопластовой капсулы-кладыша и металлической обечайки.

Процесс проводился при температуре 250 °C в течение 2–7 часов. Температура и концентрация щелочи были выбраны на основе предварительных исследований, которые показали, что такие условия обеспечивают эффективное разрушение матрицы без значительного разрушения стекловолокон [6, 7].

Для оценки степени деструкции матрицы использовался метод термогравиметрического анализа (ТГА) с использованием прибора STA 409 PC Luxx (Netzsch) [3]. Образцы подвергались нагреванию в среде воздуха, что позволяло регистрировать потери массы, связанные с разложением полимерной матрицы. Определение степени деструкции полимерной матрицы производилось по формуле:

$$\eta = \frac{(m_{\text{эт}} - m_{\text{обр}}) * 100}{m_{\text{эт}}},$$

где $m_{\text{эт}}$ – потеря массы эталонного образца, не подвергнутого сольволизу %;

$m_{\text{обр}}$ – потеря массы исследуемого образца, %.

Морфология поверхности стекловолокна исследовалась с использованием сканирующего микроскопа Hitachi SEM S-3400N, оснащенного электронной пушкой с вольфрамовым катодом, которая использовалась для микроструктурного анализа. Измерения проводились при ускоряющем напряжении 3 кВ с помощью детектора вторичных электронов (ДЭ).

После успешного извлечения стекловолокон из стеклопластиков методом сольволиза основная задача состояла в создании новых композитов с использованием этих вторичных волокон.

Для получения новых композитов брались извлеченные стекловолокна, которые были введены в эпоксидную матрицу на основе связующего SR8100/SD8824 (Sicomin). Содержание волокнистого наполнителя варьировалось от 0 % до 60 % для оценки влияния его концентрации на свойства конечных дисперсноармированных композитов.

Вторичные волокна, извлеченные после процесса сольволиза, были предварительно измельчены для равномерного распределения в матрице. С использованием ситового классификатора получена фракция коротких волокон размером менее 0,4 мм, в основном содержащая волокна размером 10–60 мкм (рис. 1).

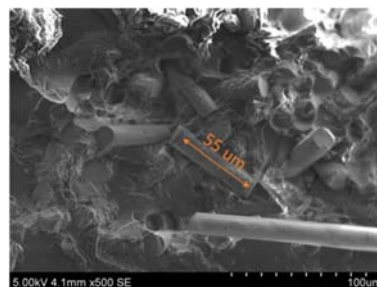


Рисунок 1 – Измерение размеров волокон

Fig. 1 – Fiber size measurement

Волокна смешивались с эпоксидным связующим при различных массовых соотношениях (5 %, 10 %, 30 %, 50 %, 60 %) для получения композитов с разной степенью армирования. Полученные смеси помещались в литевые формы, отверждались при комнатной температуре в течение 24 часов для достижения максимальной прочности и структурной однородности. Помимо этого, были изготовлены пластмассы на основе стеклосфер марки MC-ВП-A9.

Для оценки возможности повторного использования стекловолокон, извлеченных в процессе сольволиза, были проведены испытания на прочность при растяжении. Эти испытания проводились в соответствии с ГОСТ 6943.5-79 на универсальном испытательном стенде ZQ-21A (Zhiqu, Китай), оснащенный прецизионным динамометром DS2-2N (Zhiqu, Китай). Метод заключался в закреплении одиночного волокна в оправку, после чего волокно растягивалось до разрушения. Регистрировалась максимальная нагрузка, которую выдерживало волокно до момента разрушения.

Предел прочности при трехточечном изгибе композитов, изготовленных с использованием извлеченных стекловолокон, определялся на испытательной машине Instron 3382 в соответствии с ГОСТ Р 56810-2015. Образцы размерами 15x3x70 мм подвергались нагружению со скоростью 2 мм/мин.

Испытания на сжатие проводились в соответствии с ГОСТ 4651-2014 для определения прочностных характеристик образцов при сжимающей нагрузке. Образцы из вторичных стекловолокон формировались в виде параллелепипедов с размерами 3х5х6 мм, которые затем подвергались нагружению до разрушения.

Твердость композитов, изготовленных с использованием вторичных стекловолокон, исследовалась с помощью измерителя твердости ТН600 (Time Inc.) методом Бринелля. Испытания проводились с нагрузкой 2452 Н на плоских образцах толщиной не менее 7 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование влияния концентрации NaOH на скорость и степень деструкции

Известно, что NaOH легко распадается на ионы, помимо этого щелочь взаимодействует с продуктами разложения матрицы и наполнителем [8]. Высокая концентрация NaOH может привести к значительному повреждению волокон при взаимодействии щелочи и стекла [7]. Повреждения волокон имеют характерный вид: эрозия, значительная неровность поверхности и трещины.

С целью установления оптимальной концентрации NaOH проведена серия экспериментов по сольволизу стеклопластиков на основе эпоксидной и эпоксивинилэфирной матриц при температуре 250 °С и времени выдержки 3 часа. Зависимость степени деструкции композитов от массы щелочи представлена на рисунке 2.

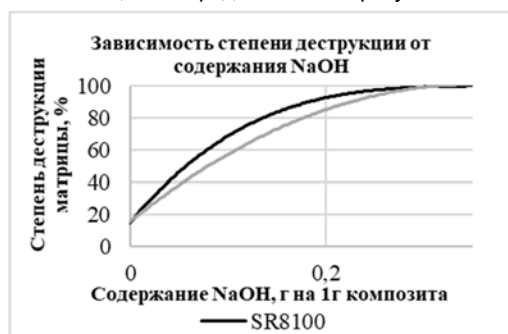


Рисунок 2 – Зависимость степени деструкции от содержания NaOH

Fig. 2 – Dependence of the degree of degradation on NaOH content

Результаты экспериментов показали, что с увеличением концентрации NaOH степень деструкции значительно возрастает. При концентрации NaOH 0,1 г на 1 г композита степень разрушения полимерной матрицы составляла около 70 % для эпоксидной матрицы и 58 % для эпоксивинилэфирной матрицы, что свидетельствует о частичном разрушении матрицы и незначительной очистке стекловолокон. Увеличение концентрации до 0,2 г NaOH приводит к существенному ускорению процесса деструкции, и степень разрушения матрицы достигала 85 % для эпоксивинилэфирной и 92 % для эпоксидной матриц. Максимальные значения были достигнуты при концентрации NaOH 0,3 г, когда степень деструкции полимерной матрицы превышала 97 %, что свидетельствовало о практически полном разрушении матрицы и полном освобождении стекловолокон. Однако при дальнейшем увеличении концентрации NaOH до 0,4 г существенного повышения эффективности процесса деструкции не наблюдалось, а, напротив, происходила частичная деструкция самих стекловолокон.

Таким образом, оптимальная концентрация NaOH была определена на уровне 0,3 г NaOH на 1 г композита, что обеспечивает достижение наибольшей степени деструкции при сохранении механических свойств стекловолокон.

Влияние времени на степень деструкции

Так как длительность процесса влияет на степень деструкции матрицы, то необходимо установить зависимость степени деструкции полимерной матрицы от времени сольволиза. Для этого была проведена серия экспериментов, направленных на установление оптимального режима процесса, в котором будет происходить максимальное разрушение матрицы при наименьших энергетических затратах. Содержание NaOH во всех случаях составляло 0,1 г к 1 г композита. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 3.

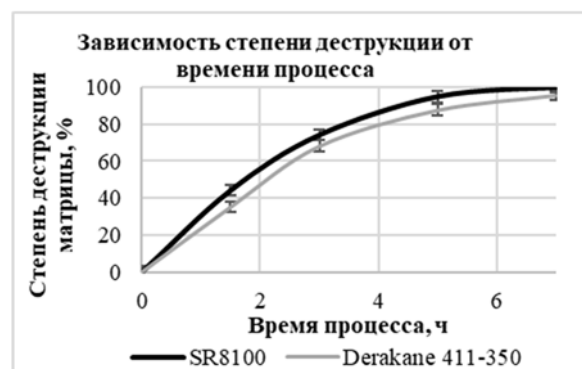


Рисунок 3 – Зависимость степени деструкции от времени процесса

Fig. 3 – Dependence of the degree of degradation on process time

При времени сольволиза 1,5 часа степень деструкции матрицы составляет около 35 % для эпоксивинилэфирной и 45 % для эпоксидной матриц, это указывает на частичное разрушение полимера и неполное извлечение стекловолокон. При увеличении времени до 3 часов степень деструкции возрастает до 68 % для эпоксивинилэфирной матрицы и 74 % для эпоксидной матрицы. При 5 часах экспозиции образцов в реакционной среде степень деструкции достигает 90 % для обоих типов матриц. Дальнейшее увеличение продолжительности сольволиза приводит к незначительному росту степени деструкции эпоксидной матрицы, о чем свидетельствует плато на кривой. При этом более продолжительное воздействие щелочной среды приводит к частичному разрушению стекловолокон.

Таким образом, диапазон 3–5 часов можно считать оптимальным для проведения процесса сольволиза полимерных композитов на основе эпоксидной и эпоксивинилэфирной матриц с целью получения восстановленного наполнителя. При этом следует учитывать, что в щелочной среде стекловолокна также подвергаются деструкции [9], в результате чего продолжительное воздействие будет пагубно влиять на их прочностные свойства.

Морфологические исследования стекловолокон после деструкции

Результаты показали, что степень деградации прочности стекловолоконных наполнителей напрямую зависит от концентрации щелочи в реакционной среде, что также подтверждается результатами в

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2025

ХИМИЧЕСКИЙ РЕЦИКЛИНГ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ МАТРИЦЕЙ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ЭТАНОЛА В ПРИСУТСТВИИ NaOH

работе [10]. Первоначальное стекловолокно гладкое (рисунок 4, а), его диаметр составляет 15,03 мкм.

При низких концентрациях NaOH (до 0,1 г на 1 г композита, рисунок 4, б) волокна сохраняли свою структуру, а их поверхность оставалась однородной с небольшими следами эрозии. Диаметр волокон уменьшился до 14,7 мкм. Также в местах контакта утка и основы иногда наблюдаются остатки полимерной матрицы, которые не были полностью удалены в результате сольволиза.

Однако при концентрациях NaOH, превышающих 0,3 г, (рисунок 4, в) на поверхности волокон начали появляться дефекты – трещины, эрозия и неорганические отложения, что свидетельствует о необратимом начале разрушения самих волокон. Диаметр в среднем составил 11,1 мкм. Аналогичная картина будет наблюдаться при низкой концентрации щелочи в реакционной среде, но длительном времени воздействия. Утончение волокон свидетельствует о разрушении поверхности и отслаивании поверхностного слоя [7, 10], что существенно ухудшает прочностные свойства.

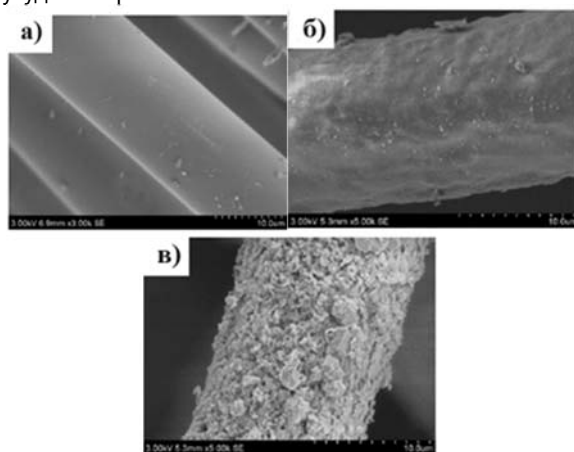


Рисунок 4 – Сравнение волокон до и после деградации:
а) до деградации, б) 0,1 г/г NaOH, в) 0,3 г/г NaOH

Fig. 4 – Comparison of fibers before and after degradation:
(a) before degradation, (b) 0,1 g/g NaOH, (c) 0,3 g/g NaOH

Прочностные свойства извлечённых стекловолокон

Для оценки возможности повторного использования стекловолокон, извлечённых в процессе сольволиза, были проведены испытания на прочность при растяжении в соответствии с ГОСТ 6943.5-79 (рис. 5).

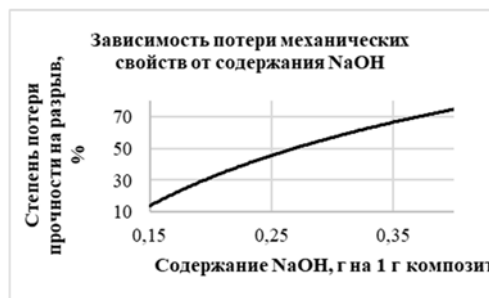


Рисунок 5 – Зависимость потери прочности на разрыв от содержания NaOH

Fig. 5 – Dependence of tensile strength loss on NaOH content

Результаты показали, что извлечённые волокна сохраняют до 85 % своей исходной прочности при оптимальных условиях сольволиза (0,15 г NaOH и 3 часа обработки), однако в данных условиях поли-

мерная матрица не удаляется полностью, что подтверждается данными на рис. 5. При увеличении концентрации NaOH до 0,4 г или увеличении времени обработки до 5 часов наблюдалось значительное снижение прочностных характеристик волокон – до 20 % от исходных значений. Это связано с появлением дефектов на поверхности волокон, вызванных обработкой щелочной среды (рис. 4, б, в), что также подтверждается результатами, представленным в работе [7].

Так как большая часть стеклянных волокон повреждена при сольволизе и площадь листов уцелевшей ткани слишком мала, то использование данных волокон в первоначальном виде затруднительно. Поэтому было решено измельчить данные наполнители до однородного состояния и использовать их для получения дисперсноармированных композитов. Данные материалы могут быть использованы в качестве высокопрочных клеевых композиций. Измельченные волокна просеивались через набор сит, после чего фракция размером 10–60 мкм вводилась в эпоксидное связующее в различных соотношениях. После отверждения из пластин дисперсноармированных пластмасс изготавливались образцы для оценки физико-механических свойств. Так как стеклосферы находят широкое применение в качестве наполнителя различных клеевых компаундов [11], в исследовании в качестве образца сравнения использовался композит на их основе с аналогичной матрицей.

Прочностные свойства полученных дисперсноармированных пластмасс представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Прочностные свойства пластмасс

Table 1 – Strength properties of plastics

Стеклопластики на основе рубленых стекловолокон			
Содержание волокон (%)	Прочность при изгибе (МПа)	Прочность при сжатии (МПа)	Твердость (НВ)
0	180,84	43,5	14,58
10	162,32	54,7	15,16
30	153,23	64,3	31,56
50	115,96	52,3	18,72
Стеклопластики на основе стеклосфер			
10	140,75	46,4	18,5
15	109,13	53,1	22,6
20	59,3	58,2	26,1

По данным, представленным в таблице 1, наблюдается снижение максимальной нагрузки при трехточечном изгибе, что приводит к снижению прочности. Данный факт вызван увеличением хрупкости образцов. Свойства композитов на изгиб, полученных с использованием стеклосфер, ухудшаются значительно быстрее, чем у образцов с измельченными волокнами, что связано с размером и геометрией наполнителя.

Снижение прочности при изгибе с увеличением содержания измельченных волокон может быть обусловлено рядом факторов. С одной стороны, введение высокомодульных волокон приводит к повышению жесткости материала. С другой стороны, при больших концентрациях наполнителя возрастает вероятность скопления волокон, которые выступают в роли концентраторов напряжений.

Испытания на сжатие проводились в соответствии с ГОСТ 4651-2014. Образцы с содержанием стекловолокон 10 %, 15 %, 30 % и 50 % были подвергнуты нагрузке до разрушения. Результаты пока-

зали, что композиты с 30 % содержанием стекловолокон имели наивысшую прочность при сжатии – 64,3 МПа, что также превосходит значения для неармированных композитов (43,5 МПа).

Результаты испытаний на сжатие показали, что прочность композитов с увеличением содержания волокон сначала растёт, но при концентрации волокон выше 50 % прочностные свойства начинают ухудшаться. Это связано с тем, что при высоких концентрациях армирующий наполнитель неравномерно распределяется в матрице, что ведёт к образованию слабых зон и растрескиванию при сжатии [8].

Твёрдость композитов исследовалась методом Бринелля с использованием прибора ТН600 (Time Inc.). Результаты показали, что увеличение содержания стекловолокон приводит к повышению твёрдости материала. Образцы с 30 % содержанием волокон имели твёрдость 18,72 НВ, что значительно выше, чем у неармированных композитов (14,58 НВ). Твёрдость пластиков на основе стеклосфер выше (18,5 НВ для 10 % содержания), что связано с большей жесткостью стеклосфер и растёт быстрее с увеличением их содержания.

Исследование микроструктуры. Для исследования распределения волокон в матрице и анализа структуры поверхности композитов использовался сканирующий электронный микроскоп Hitachi SEM S-3400N. СЭМ-изображения показали, что при содержании волокон до 30 % (рис. 6, б, в) армирующий наполнитель распределён равномерно, что способствует эффективной передаче напряжений между волокнами и матрицей (изотропности композитов) [12].

Наличие коротких волокон способствует повышению прочности, жесткости и трещиностойкости материала за счет эффективного распределения напряжений между полимером и армирующим наполнителем [12]. Вместе с тем, высокое содержание наполнителя может привести к ухудшению технологических свойств из-за высокой вязкости.

Однако при содержании волокон выше 50 % (рисунк 6, г) наблюдались агломераты волокон и неравномерное распределение, что негативно сказывалось на механических свойствах композитов, это является распространенной проблемой данных пластмасс [13].

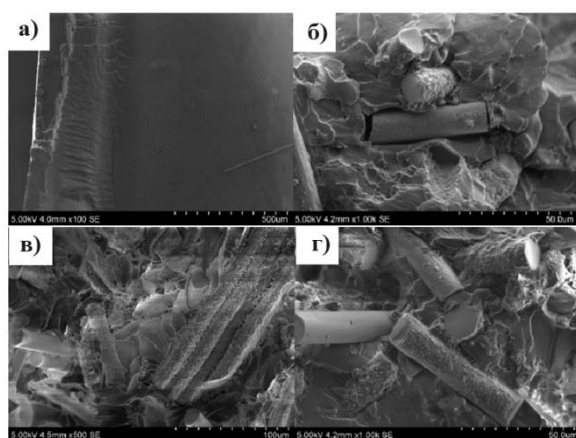


Рисунок 6 – Микроскопия полученных пластмасс: а) образец I (0 %), б) образец II (10 %), в) образец III (30 %), г) образец IV (50 %)

Fig. 6 – Microscopy of obtained plastics: (a) sample I (0%), (b) sample II (10%), (c) sample III (30%), (d) sample IV (50%)

Общая тенденция показала, что композиты с 30 % содержанием извлечённых стекловолокон демонстрировали лучшие механические свойства: высокую прочность на сжатие, повышенную твердость и хорошее распределение волокон в матрице. Однако при увеличении содержания волокон до 50 % (рисунк 6, г) и более свойства композитов ухудшались, что связано с проблемами равномерного распределения волокон в полимерной матрице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был исследован процесс деструкции стеклопластиков с эпоксидной и эпоксивинилэфирной матрицами в присутствии щелочи. Экспериментально получены зависимости степени деструкции реактопластичных матриц от концентрации NaOH и времени процесса. Установлено, что при концентрации NaOH 0,3 г на 1 г композита и температуре 250 °C за 5 часов удается разрушить до 90 % полимерной матрицы. При этом увеличение времени обработки и повышение концентрации NaOH до 0,4 г снижает прочность волокон на 75 %.

Извлеченные волокна измельчались, после чего использовались в качестве наполнителя для получения дисперсноармированных стеклопластиков. Содержание наполнителя в образцах пластмасс варьировалось в диапазоне от 5 до 60 %. Установлено, что композиты, содержащие 30 % наполнителя, обладают лучшими прочностными свойствами: прочность на сжатие 64,3 МПа и твердость 18,72 НВ. При этом прочность полученных дисперсноармированных пластиков оказалась выше, чем в случае использования стеклосфер в качестве наполнителя. Таким образом, разработанный метод позволяет эффективно перерабатывать стеклопластики и получать сырье для новых композитов с улучшенными физико-механическими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of aviation polymer composite materials: I. Influence of significant factors // Russian metallurgy (Metally). 2020. Т. 2020. № 4. С. 364–372. DOI: 10.1134/S0036029520040102.
2. Volkova K.V. [et al.]. Study of plasmachemical processing effect on the properties of polymer films based on polyvinylchloride // Journal Scientific and Technical Of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2017. Т. 111. № 5. С. 834–840. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-11-5-834-840.
3. Ильиных Г.В. Основные направления утилизации углепластиков // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. № 12. С. 69–78.
4. Protsenko A., Lyukho I., Petrov V. Extraction of chemical components from polymer composites waste // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2023. Т. 2910. № 1. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0169381>.
5. Проценко А.Е. [и др.]. Химический рециклинг стеклопластиков с термореактивной матрицей в среде сверхкритического этанола: QFXUVR // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 193–200. DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.025>.
6. Protsenko A.E., Petrov V.V. Strengthening of glass fibers obtained by recycling of polymer composite material // Strengthening Technologies and Coatings. Innovative Mashinostroyeniye Publishing, 2022. Vol. 18. P. 347–351. DOI: <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-8-347-351>.
7. Protsenko A.E., Petrov V.V. Recycling of fiberglass fillers obtained from polymer composites based on an epoxy vinyl ester binder // Mechanics of Composite Materials. 2022. Т. 58. № 4. С. 537–544. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10048-9>.

ХИМИЧЕСКИЙ РЕЦИКЛИНГ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С ТЕРМОРЕАКТИВНОЙ МАТРИЦЕЙ В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ЭТАНОЛА В ПРИСУТСТВИИ NaOH

8. Whalen D.L. Mechanisms of hydrolysis and rearrangements of epoxides // *Advances in Physical Organic Chemistry*. 2005. Т. 40. С. 247–298. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-3160\(05\)40006-4](https://doi.org/10.1016/S0065-3160(05)40006-4).

9. Старцев В.О. Влияние агрессивных жидкостей на свойства полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 8 (114). С. 98–112.

10. Liu J. [et al.]. Tensile behaviors of ECR-glass and high strength glass fibers after NaOH treatment // *Ceramics International*. 2013. Т. 39. № 8. С. 9173–9178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.05.018>.

11. Старшова Я.В., Панфилов Д.А. Применение микросфер для регулирования свойств полимерных композиционных материалов // *Пластические массы*. 2023. Т. 1. № 5–6. С. 37–40.

12. Ashraf M.A. [et al.]. Effects of size and aggregation/agglomeration of nanoparticles on the interfacial/interphase properties and tensile strength of polymer nanocomposites // *Nanoscale research letters*. 2018. Т. 13. С. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2624-0>.

13. Sevenois R.D.B. [et al.]. Numerical study on the effect of matrix self-heating on the thermo-visco-plastic response of continuous fiber-reinforced polymers under transverse tensile loading // *Polymers*. 2022. Т. 14. № 10. С. 1941. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14101941>.

Информация об авторах

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

И. А. Люхо – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета.

REFERENCES

1. Kablov, E.N. & Startsev, V.O. (2020). Climatic aging of aviation polymer composite materials: I. Influence of significant factors. *Russian metallurgy (Metally)*, 2020(4), 364–372. DOI: 10.1134/S0036029520040102.

2. Volkova, K.V., Trotsenko, I.V. & Valerievna, U.M. (2017). Study of plasmachemical processing effect on the properties of polymer films based on polyvinylchloride. *Journal Scientific and Technical Of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 111(5), 834–840. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-834-840

3. Ильиных, Г.В. (2019). Основные направления утилизации углепластиков. *Бюллетень науки и практики*, 5(12), 69–78.

4. Protsenko, A., Lyukho, I. & Petrov, V. (2023, October). Extraction of chemical components from polymer composites waste. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2910,

No. 1). AIP Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0169381>

5. Проценко, А.Е., Петров, В.В., Проценко, А.Н. & Люхо, И.А. (2023). Химический рециклинг стеклопластиков с термореактивной матрицей в среде сверхкритического этанола: QFXUVR. *Ползуновский вестник*, (2), 193–200. DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.025>.

6. Protsenko, A. & Petrov, V. (2022). Strengthening of glass fibers obtained by recycling of polymer composite material. *Strengthening Technologies and Coatings*, 347–351. DOI: <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-8-347-351>.

7. 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10048-9>.

8. Whalen, D.L. (2005). Mechanisms of hydrolysis and rearrangements of epoxides. *Advances in Physical Organic Chemistry*, 40, 247–298. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-3160\(05\)40006-4](https://doi.org/10.1016/S0065-3160(05)40006-4).

9. Старцев, В.О. (2022). Влияние агрессивных жидкостей на свойства полимерных композиционных материалов (обзор). *Труды ВИАМ*, (8 (114)), 98–112.

10. Liu, J., Jiang, M., Wang, Y., Wu, G. & Wu, Z. (2013). Tensile behaviors of ECR-glass and high strength glass fibers after NaOH treatment. *Ceramics International*, 39(8), 9173–9178. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.05.018>.

11. Старшова, Я.В. & Панфилов, Д.А. (2023). Применение микросфер для регулирования свойств полимерных композиционных материалов. *Пластические массы*, 1(5-6), 37–40.

12. Ashraf, M.A., Peng, W., Zare, Y. & Rhee, K.Y. (2018). Effects of size and aggregation/agglomeration of nanoparticles on the interfacial/interphase properties and tensile strength of polymer nanocomposites. *Nanoscale research letters*, 13, 1–7. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2624-0>.

13. Sevenois, R.D., Hao, P., Van Paepegem, W. & Gilabert, F.A. (2022). Numerical study on the effect of matrix self-heating on the thermo-visco-plastic response of continuous fiber-reinforced polymers under transverse tensile loading. *Polymers*, 14(10), 1941. <https://doi.org/10.3390/polym14101941>.

Information about the authors

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

I.A. Lyukho - postgraduate student 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 17 декабря 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.