УДК 678.067.5

Е. Г. Федарович
Белорусский государственный технологический университет

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ СТЕКЛОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ТЕРМОРЕАКТИВНОГО СВЯЗУЮЩЕГО (ОБЗОР)

В статье проведен анализ научно-технической литературы в области утилизации отходов стеклопластика на основе термореактивного связующего. Показано, что проблема накопления отходов стеклопластика является актуальной материаловедческой задачей, решение которой требует использования современных методов утилизации. Наиболее распространенная в настоящее время утилизация отходов стеклопластика методом захоронения приводит к экологическим проблемам. Решением проблемы является утилизация отходов стеклопластика с получением вторичных материальных ресурсов. В статье были подробно рассмотрены химические, термические и механический методы утилизации отходов стеклопластика. Проанализированы результаты зарубежных исследований использования различных технологий утилизации стеклопластика на основе термореактивного связующего с целью получения вторичного армирующего компонента. Показано влияние различных методов утилизации отходов стеклопластика на прочностные свойства получаемого вторичного волокна. Проведена сравнительная характеристика достоинств и недостатков рассмотренных методов утилизации стеклопластиков. Сформулированы выводы о пригодности рассмотренных методов для получения из отходов стеклопластика на основе термореактивного связующего вторичных материалов. Сделано заключение о перспективности использования механического метода утилизации стеклопластиков на основе термореактивного связующего.

Ключевые слова: стеклопластик, термореактивное связующее, утилизация отходов, вторичный материал, стекловолокно.

Для цитирования: Федарович Е. Г. Перспективные технологии утилизации отходов стеклопластика на основе термореактивного связующего (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 2 (295). С. 87–101.
DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-12.

E. G. Fedarovich
Belarusian State Technological University

ADVANCED WASTE DISPOSAL TECHNOLOGIES GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC BASED ON A THERMOREACTIVE BINDING AGENT (REVIEW)

The article analyzes scientific and technical literature in the field of recycling of waste fiberglass-reinforced plastic based on a thermosetting binder. It is shown that the problem of accumulation of waste fiberglass-reinforced plastic is an urgent materials science task, the solution of which requires the use of modern recycling methods. The most common method of recycling fiberglass-reinforced plastic waste is burial, which leads to environmental problems. The solution to the problem is recycling fiberglass-reinforced plastic waste to obtain secondary materials. The article examines in detail chemical, thermal and mechanical methods of recycling fiberglass-reinforced plastic waste. The results of foreign studies on the use of various technologies for recycling fiberglass-reinforced plastic based on a thermosetting binder in order to obtain a secondary reinforcing component are considered. The influence of various methods of recycling fiberglass-reinforced plastic waste on the strength properties of the resulting secondary fiber is shown. A comparative characteristic of the advantages and disadvantages of the considered methods of recycling fiberglass-reinforced plastic is carried out. Conclusions are formulated on the suitability of the considered methods for obtaining secondary materials from waste plastic reinforced with glass fiber based on a thermosetting binder. A conclusion is made on the prospects of using a mechanical method for recycling plastic reinforced with glass fiber based on a thermosetting binder.

Keywords: glass fiber plastic, thermosetting binder, waste recycling, recycled material, fiberglass.

For citation: Fedarovich E. G. Advanced waste disposal technologies glass fiber reinforced plastic based on a thermoreactive binding agent (review). *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Genecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 87–101 (In Russian).
DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-12.

Введение. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко используются во всем мире в качестве заменителей традиционных. Связано это в первую очередь с их эксплуатационными и потребительскими свойствами: высокой прочностью в соотношении с небольшой удельной плотностью, химической и биологической стойкостью, низкой теплопроводностью, долговечностью, возможностью задавать различные формы готовых изделий и простотой изготовления [1, 2].

Наибольшее распространение среди производимых ПКМ получили стеклопластики на основе термореактивного связующего. Использование стекловолокна для производства на его основе композиционных материалов во многом определяется его высокими физико-механическими свойствами. При сравнительно малой плотности $(2{,}4–2{,}6)\cdot10^3$ кг/м^3 оно имеет высокую прочность при растяжении и сжатии, обладает низкой теплопроводностью и повышенной химической инертностью. Наибольшее распространение получили стеклянные волокна бесщелочного состава (Е-стекло, АБС) [3–5]. Применение термореактивных полимеров (эпоксидные, фенолформальдегидные смолы, ненасыщенные полиэфиры, виниловые эфиры и кремнийорганические полимеры) в качестве матричного материала обусловлено не только причиной высоких потребительских качеств, но и тем, что низкая вязкость исходных смол, используемых в процессе получения армированных пластиков, позволяет применять широкий ряд технологических приемов, обеспечивающих быструю и равномерную пропитку армирующей фазы. Спектр термореактивных связующих, для полимеризации в которых применяют инициаторы (катализаторы), дает возможность использовать системы, которые могут отверждаться при достаточно низких температурах в заданных временных интервалах [6, 7].

Согласно данным Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe eV (Немецкая ассоциация производителей ПКМ), мировой рынок композиционных материалов в 2024 г. составил 13,5 млн т с ежегодным приростом около 4%. Стеклопластики занимают приблизительно 95% всего рынка ПКМ. Крупнейшими производителями ПКМ в настоящее время являются Германия (19%) и страны Восточной Европы (18,9%) [8]. Более 50% стеклопластика используется в транспортном секторе и около 18% – для производства электроники и электротехники.

Массовое производство стеклопластика непременно приводит к образованию большого количества отходов. В настоящее время в разных странах мира уже присутствует проблема утилизации. В Китае накопилось миллионы тонн отходов стеклопластика, и их количество увеличивается со скоростью более 100 тыс. т в год [9]. В Соединенных Штатах спрос на ПКМ в 2017 г. вырос почти до 2 млн т с количеством производственных отходов около 5% [10, 11]. С ростом ветроэнергетики в таких странах, как Дания, Германия, Испания и Нидерланды, остро встает межотраслевая проблема утилизации вышедших из эксплуатации лопастей ветряных турбин, которые на 80–90% состоят из композиционных материалов, в частности стеклопластика. К 2050 г. ожидается, что количество отходов лопастей ветряных турбин составит около 43 млн т [12, 13]. Международная ассоциация воздушного транспорта (IATA) подсчитала, что в ближайшие 10 лет (2020–2030 гг.) из эксплуатации будет выведено 11 000 самолетов, которые в своей конструкции содержат до 50% композиционных материалов, армированных стекловолокном [14]. Помимо вышеперечисленных источников образования отходов стеклопластика, значительную долю в общем объеме мировых отходов составляют вышедшие из эксплуатации электронные платы, изготавливаемые на 27,5–45,5% из стеклопластика [15, 16]. Вблизи гаваней и центров выгрузки рыбы вдоль побережья Керала в Индии заброшенные суда встречаются в количестве 13–48 судов на километр, что соответствует 1,42 т отходов стеклопластика на 1 км. По оценкам ЕС, ежегодно количество вышедших из эксплуатации и брошенных судов, изготавливаемых на 95% из пластика, армированного стекловолокном, составляет от 6000 до 9000 [17, 18].

Образующиеся отходы в настоящее время в большинстве случаев утилизируются методом захоронения, что непосредственно оказывает негативное воздействие на окружающую среду. Обнаружено, что отходы стеклопластика, образующиеся при утилизации или ремонте судов в море, со временем распадаются на микропластик и стекловолокно, которые задерживаются в организмах ракообразных, вызывая воспалительные процессы, нарушение функции плавания и затопление животных [19]. Отходы лопастей ветряных турбин, выведенные из эксплуатации самолеты ввиду отсутствия совершенных способов переработки утилизируются на полигонах, занимая с каждым годом все больше площадей, влияя на эксплуатационную функцию почвы, среду обитания животных и нанося вред земельным ресурсам [20].

В результате с целью решения экологических проблем и снижения потребности в природных ресурсах большинство государств принимает законопроекты, ограничивающие или полностью запрещающие возможность утилизации

отходов стеклопластика и композиционных материалов методом захоронения. Германия одна из первых ввела запрет на захоронение отходов ПКМ с содержанием органической составляющей (связующего) более 5%. В Нидерландах, согласно 3-му изданию Национального плана по управлению отходами, запрещается захоронение отходов ПКМ, за исключением случаев, если стоимость вторичной переработки составляет свыше 200 евро/т. Франция рассматривает возможность введения целевого показателя переработки для ветряных турбин на основе стеклопластика в свою нормативную базу [21, 22].

Решением проблемы накопления отходов стеклопластика на основе термореактивного связующего является его утилизация с получением вторичных материалов и их частичным или полным возвратом в промышленное производство. Такой подход позволит снизить нагрузку на окружающую среду, получить новые конкурентоспособные изделия, содержащие вторичные материалы, что приведет к замкнутому циклу процесса производства ПКМ в соответствии с циркулярной экономикой.

Основная часть. В настоящее время известны три основные группы методов утилизации отходов стеклопластиков на основе термореактивных смол: механические, химические и термические (рис. 1).

Термические методы утилизации ПКМ в зависимости от содержания кислорода разделяются на методы сжигания (при содержании кислорода, близком или превышающем стехиометрическое), газификации (при недостатке кислорода) и пиролиза (отсутствие кислорода). Также к этой группе методов зачастую относят окисление в псевдоожиженном слое.

Сжигание представляет собой полное окисление полимерной матрицы. В данном случае целевым продуктом переработки является не материал, а энергия. Эта тема достаточно широко изучена в научных работах S. J. Pickering [23, 24], в которых автор рассматривает теплотворную способность различных термореактивных смол, влияние наполнителей, входящих в состав композита на процесс горения. К примеру, было установлено, что большинство изученных смол (полиэфирные, винилэфирные, фенольные и эпоксидные) имеет теплотворную способность 30 000 кДж/кг, за исключением карбамидоформальдегидной, теплотворная способность которой составляет 15 700 кДж/кг. При этом теплотворная способность будет напрямую зависеть от количества горючего материала в ПКМ и может уменьшаться за счет наполнителя, который поглощает тепло. Например, распространенный карбонат кальция, входящий в составе ПКМ в качестве наполнителя, поглощает при сжигании 1800 кДж/кг.

Наибольшее распространение данный метод получил при сжигании отходов стеклопластика в цементных печах: полимерная матрица выступает в качестве альтернативного топлива, а минеральная часть армирующего компонента – кремний, карбонат кальция, глинозем и т. д. – как часть цементного клинкера [25, 26]. Также есть исследования, показывающие возможность использования отходов стеклопластика на основе термореактивного связующего в качестве частичного заменителя твердого топлива при производстве кирпича [27].

Несмотря на высокую теплотворную способность термореактивного связующего, его содержание в композитах, как правило, не превышает 40%, что ограничивает их использование в качестве топлива в цементных печах и при производстве кирпича. Кроме того, наличие в отходах ПКМ бора в больших количествах негативно влияет на поведение цемента при схватывании. Использование отходов стеклопластика также невозможно без стадии сортировки и измельчения, так как отходы должны иметь определенный гранулометрический состав без присутствия посторонних материалов (металлические вставки и др.) с теплотворной способностью не ниже 5000 ккал/кг [24, 25, 28].

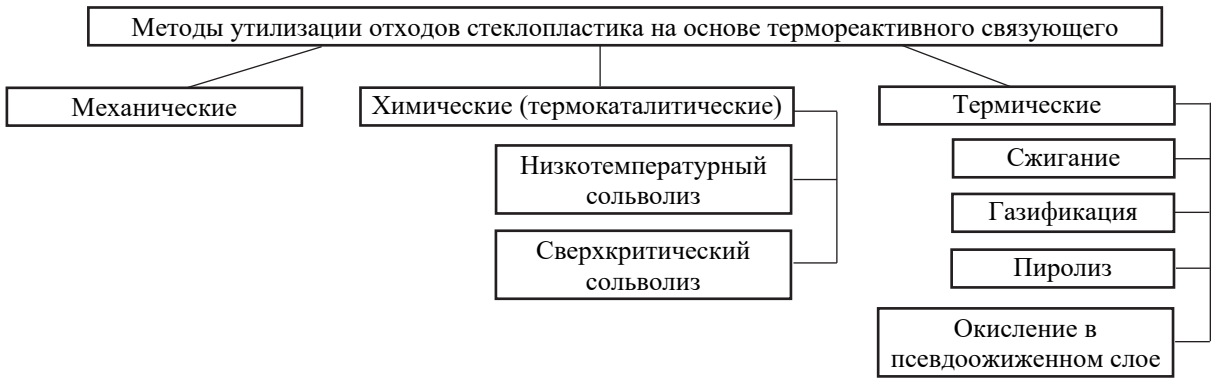

Рис. 1. Методы утилизации отходов стеклопластиков на основе термореактивного связующего

Как указано выше, сжигание отходов стеклопластика имеет ряд недостатков, однако ввиду непрерывного роста цен на невозобновляемое органическое топливо получение энергии за счет сжигания отходов привлекает большое внимание. По некоторым оценкам, в настоящее время сжигается до 40% всех полимерных отходов [29]. При этом необходимо учитывать, что около 50% композитных отходов остается в виде золы, которую также следует утилизировать методами захоронения, что требует дополнительных затрат [30]. В дополнение ко всему, в процессе сжигания могут образовываться токсичные газы, хлорид водорода, оксиды азота, цианистые соединения и др. [31]. Известно, что на некоторых станциях по сжиганию отходов обнаружен диоксин в количествах, представляющих опасность для человека [32].

Утилизация ПКМ с целью получения альтернативного топлива также возможна с помощью метода газификации, основанного на преобразовании органических веществ в смесь оксидов углерода и водорода в результате воздействия смеси кислорода и водяного пара. Получаемый при газификации синтез-газ используют для производства тепловой и электрической энергии. По имеющимся данным, количество газа, полученного из одной тонны твердых бытовых отходов при помощи плазменной газификации, будет достаточным для производства более чем 1 МВт электроэнергии [32, 33]. Данный метод очень перспективен для углепластиков, но ввиду малого содержания газифицирующих веществ экономически не выгоден для стеклопластиков.

Одним из наиболее исследуемых до настоящего времени методов утилизации ПКМ является пиролиз. Пиролиз, представляющий собой деструктивный процесс, позволяет отделить синтетические волокна от полимерной матрицы за счет ее разложения в инертной среде при нагреве до температур от 450 до 1050°С [34, 35].

Сущность пиролиза отходов ПКМ заключается в следующем: отходы нагреваются при отсутствии воздуха, в результате чего образуются жидкие, газообразные и твердые фракции. Жидкая фракция представляет собой ароматический углеводород, теплотворная способность которого составляет 37 МДж/кг, что сопоставимо с топливом, поэтому она может быть использована в самой установке пиролиза, как и газовая фракция. Твердый продукт процесса представляет собой волокна [36, 37].

К сожалению, утилизация отходов стеклопластика данным методом не получила широкого распространения, что обусловлено спецификой процесса пиролиза, оказывающего негативное влияние на вторичное армирующее волокно. За счет проведения процесса пиролиза при почти полном отсутствии кислорода на поверхности волокон образуется углерод, существенно снижающий механические свойства волокон. Для удаления углерода в процессе пиролиза используют большие объемы воздуха и дополнительную постпиролизную обработку путем окисления, проводимого при определенных параметрах температуры и времени выдержки [38]. Также многими исследователями отмечается, что процессы пиролиза и постпиролиза существенно изменяют структуру поверхности волокна, ухудшая адгезию на границе раздела фаз «волокно – матрица» и непосредственно снижая механические свойства вторичных волокон [39–43].

Указанные выше недостатки частично решаются при использовании относительно нового процесса микроволнового пиролиза. В данном случае за счет более быстрого и равномерного нагрева материала при сравнительно низких температурах стекловолокно в меньшей степени подвержено термической деструкции. Проведенные исследования показывают противоречивые результаты. Так, микроволновой пиролиз отходов ветряных турбин позволил получить стекловолокно с потерей прочности в 25% [42]. Исследования процессов микроволновой переработки стеклопластиков на основе полиэфирной смолы показали снижение прочности на разрыв композитов, изготовленных из вторичных волокон на 76% [44].

Более совершенным с точки зрения решения проблемы загрязнения вторичных волокон углеродом в процессе пиролиза является процесс переработки стеклопластиковых материалов методом окисления в псевдоожиженном слое. Сущность метода заключается в разложении полимерной матрицы композита в слое кварцевого песка, который под действием потока воздуха (450–550°С) переходит в состояние псевдоожижения [24, 45].

На рис. 2 представлена схема процесса переработки стеклопластика методом окисления в псевдоожиженном слое. Отходы стеклопластика на основе термореактивных смол, предварительно измельченные до более мелких кусков, поступают на разогретый и находящийся в состоянии псевдоожижения кварцевый песок. За счет высокой скорости теплопередачи и механического воздействия полимерная матрица сгорает. Оставшиеся волокна и неразложившиеся наполнители подхватываются воздушным потоком и выносятся из камеры реактора на стадию их разделения. Образующийся при этом газ может быть повторно использован в реакторе как теплоноситель [33, 45, 46].

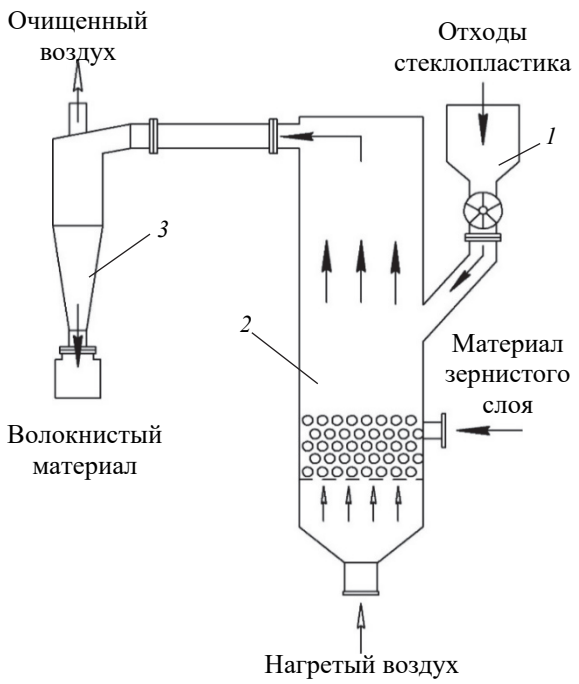

Рис. 2. Переработка стеклопластика методом окисления в псевдоожиженном слое [33]:
1 – питатель подачи отходов стеклопластика;
2 – камера псевдоожижения; *3* – циклон

Однако исследования [45, 47] показывают ограничения применения данного метода, так как в результате переработки за счет воздействия на волокна достаточно высоких температур вторичное стекловолокно теряет до 50–80% прочности на разрыв в зависимости от температуры относительно первичных волокон. Уменьшение прочности также связано с воздействием на волокна частиц псевдоожиженного слоя, которые за счет истирания приводят к измельчению волокон и образованию на их поверхности дефектной структуры. Кроме того, образующиеся в ходе разложения полимерной матрицы вредные летучие компоненты нуждаются в дополнительной системе очистки воздуха. Заинтересованность в данном методе переработки в основном заключается в возможности обработки смешанных отходов термореактивного стеклопластика с различными видами армирования и наличием металлических вставок.

Рассмотрев возможные термические методы утилизации стеклопластика, можно с уверенностью говорить об их пригодности только для преобразования отходов в источник тепла. Получение данными методами вторичных материалов является малоперспективным ввиду нерешенных задач деградации волокон за счет воздействия высоких температур и в случае пиролиза образования на его поверхности углерода. Помимо того, серьезным препятствием к распространению данных методов является возможное присутствие в отработанных газах вредных компонентов.

Утилизация стеклопластика без воздействия относительно высоких температур, влияющих на механические свойства вторичных волокон, осуществляется химическими методами, наиболее перспективными из которых считаются низкотемпературный и сверхкритический сольволиз [48, 49].

Сольволиз представляет собой процесс, в котором полимеры химически превращаются в мономеры или частично деполимеризуются в олигомеры посредством химических реакций. В зависимости от природы растворителя сольволиз называют гидролизом (использование воды), гликолизом (с использованием гликоля, метанола, этанола, ацетона) и т. д. [50, 51].

Низкотемпературный сольволиз осуществляется при атмосферном давлении и температурах до 200°С с использованием добавок и катализаторов. Основным достоинством данного метода выступает проведение процесса при атмосферном давлении, что существенно уменьшает затраты на переработку отходов стеклопластика за счет использования менее дорогостоящих реакторов. Однако применение в процессе низкотемпературного сольволиза агрессивных растворителей, которые при нагреве приводят к образованию токсичных газов, делает данный метод сомнительным с точки зрения экологической безопасности [52]. Сверхкритический сольволиз происходит в диапазоне температур 350–450°С и давлении 4–27 МПа. Сверхкритические жидкости имеют свойства, промежуточные между газовой и жидкой фазами: низкая вязкость, высокий коэффициент диффузии, высокая растворяющая способность. Благодаря им, процесс сольволиза происходит эффективнее с более полным растворением матрицы [53, 54].

В настоящее время имеется ряд исследований, изучающих процесс сольволиза стеклопластика в зависимости от типа полимерной матрицы и использующихся в процессе переработки растворителей. В работах [50, 55] изучали способность перерабатывать отходы стеклопластика на основе полиэфирного связующего методам сольволиза. В качестве растворителей были использованы сверхкритические растворы на водной основе. В результате получили волокна, механическая прочность которых снижена на 50–60% по сравнению с первичными. Такие результаты свидетельствуют о трудностях применения сольволиза для переработки композитов, армированных стекловолокном, ввиду хрупкости волокон при воздействии высоких температур и растворителей. В исследовании [56] сольволиз стеклопластика на основе эпоксидного и эпоксивинилэфирного связующих осуществляли в среде сверхкритического этанола при температуре 280°С. Установлено, что на поверхности вторичных волокон, полученных

из эпоксивинилэфирного стеклопластика, содержится 24,5% остатков матрицы, что говорит о недостаточной эффективности процесса для данного материала, в отличие от волокон, полученных из эпоксидного пластика, в которых содержание матрицы на поверхности составляет всего 0,96%. В работе [57] определен оптимальный режим сольволиза, осуществляемый при температуре 180°С и концентрации катализатора 5% в течение 6 ч, позволяющий получать волокна из эпоксивинилэфирного стеклопластика с прочностью на разрыв, равной 92% от прочности исходных волокон. Схожие результаты получены в исследовании [58], в котором практически полное разложение полимерной матрицы достигнуто путем использования сверхкритического метанола в присутствии катализатора 4-диметиламинопиридина, с практически полным сохранением механических свойств вторичных волокон.

Как видно из упомянутых исследований, сольволиз позволяет с помощью растворителей в определенных условиях разложить полимерную матрицу с практически полным высвобождением волокон. Однако, как и в случае с термическими методами, в процессе сольволиза волокна также в значительной степени подвергаются деструкции. За счет относительно меньших температур термическое воздействие имеет гораздо меньшее влияние на снижение прочностных характеристик вторичных волокон, но присутствие в процессе сольволиза агрессивных растворителей приводит к их хрупкости. При этом проведение процесса сольволиза с использованием растворителей при условиях повышенного давления и заданных температур требует создания весьма дорогостоящего оборудования. Кроме того, применение в процессе химической переработки растворителей создает новые проблемы их утилизации, требующие дополнительных систем очистки и затрат.

Наиболее распространенным, перспективным и практически реализуемым методом утилизации отходов стеклопластиков на основе термореактивного связующего выступает механический метод.

Механическая переработка стеклопластиковых отходов предполагает уменьшение их размеров до более мелких кусков с последующей сортировкой на продукты. Измельчение до кусков с размером 50–100 мм преимущественно используется в совокупности с ранее перечисленными методами переработки, так как в большинстве случаев процессы пиролиза, сольволиза и т. д. требуют предварительного измельчения материала. Для более тонкого измельчения используются высокоскоростные мельницы. Продукты измельчения в данном случае можно разделить на два основных класса: «грубый» и «тонкий». «Грубый» класс состоит из крупных частиц, пучков волокон, скрепленных смолой, слишком крупных для использования в качестве наполнителя, но потенциально пригодных для применения в качестве армирующих компонентов в других новых материалах. К данному классу можно отнести частицы размером более 0,5 мм. «Тонкий» класс представляет собой более мелкие частицы измельченного волокна и полимерного связующего, которые могут быть использованы только в качестве наполнителя [59, 60].

Несмотря на ухудшение механических свойств вторичного стекловолокна и его адгезионного взаимодействия с полимерным связующим [61], многими авторами подчеркивается возможность применения вторичных волокон как частичной замены первичных при производстве новых композиционных материалов. В работах [62–64] из продуктов измельчения отходов стеклопластика методами рассева на сите и пневмоклассификации выделяли волокна, длина которых более 3–4 мм. Полученный волокнистый материал в количестве до 5–10% использовался для изготовления образцов стеклопластика, которые по своим физико-механическим свойствам практически не отличались от эталонных. Известны исследования, использующие продукты (волокна и наполнители) разных марок механической переработки стеклопластика фирмы ERCOM для получения на их основе новых ПКМ. Исследователями из Западнопоморского технологического университета [65] сделан вывод, что введение 15% вторичных волокон длиной 3–6 мм совместно с наполнителем с размером зерен до 0,2 мм приводит к снижению механических свойств композитов на 20–30 %. При этом введение только наполнителя в количестве до 10% вызвало улучшение прочности на изгиб новых изделий на 10–30% в зависимости от его гранулометрического состава, что связано с наличием в нем мелких волокон. J. Petterson и P. Nilsson [66] использовали комбинацию, состоящую из волокон длинной 0,5–3,0 мм и наполнителя с размером зерен 0,2–0,5 мм, в результате чего изделия обладали прочностью на изгиб 59% и ударной вязкостью 64% в зависимости от эталонного образца.

Немаловажную роль в механическом методе утилизации стеклопластика играет классификация продуктов измельчения композита. S. J. Pickering в исследовании [67] показывает возможность использования продуктов измельчения стеклопластика в цементных растворах. Отмечается важность процессов классификации продуктов механической переработки, так как введение в цементный раствор условно средней, мелкой и тонкой фракций в количествах до 3% уменьшают прочность на сжатие цемента на 26–41%, при этом использование крупной фракции в количестве до 5% позволяет увеличить прочность на изгиб на 36%.

Основным препятствием более широкого применения механических методов переработки стеклопластика, как отмечают авторы вышеперечисленных работ, является уменьшение качества изделий при введении большего количества вторичных волокон, что обусловлено несколькими причинами. Как уже упоминалось ранее, без качественной классификации продуктов измельчения стеклопластика во вторичном волокнистом материале будут присутствовать волокна разной длины, от которой зависит, будут они улучшать или ухудшать механические свойства композита. Наличие в волокнистой фракции недоизмельченных волокон, скрепленных матрицей, ухудшает прочность готовых изделий. За счет неполного измельчения полимерной матрицы на поверхности волокон содержатся ее частицы, уменьшающие фактическое количество стекловолокна в волокнистой фракции [68, 69].

При этом к достоинствам механического метода переработки отходов термореактивного стеклопластика можно отнести сравнительную простоту технологического оформления, применимость для практически любых видов термореактивного стеклопластика, одновременную переработку армирующих волокон и полимерного связующего, отсутствие вредных выбросов и испарений.

По итогам выполненного литературного анализа наиболее распространенных и перспективных методов утилизации отходов термореактивного стеклопластика, для проведения сравнительного анализа в таблицу были сведены их основные достоинства и недостатки.

Достоинства и недостатки методов переработки отходов стеклопластика на основе термореактивного связующего

Группа методов	Метод	Достоинства	Недостатки
Механические	Измельчение	Отсутствие выбросов вредных газов в окружающую среду Простота технологического оформления процесса Возможность переработки больших объемов отходов Возможность переработки как армирующего компонента с получением вторичных волокон, так и полимерной матрицы с получением наполнителя	Снижение механических свойств армирующих компонентов Сложность регулирования размеров волокон во время измельчения Сложность осуществления процессов классификации продуктов измельчения Наличие частиц матрицы на поверхности волокон, снижающих фактическое содержание стекловолокна в волокнистой фракции Высокая энергоемкость процессов измельчения, дробления, резания
Термические	Сжигание	Получение тепла	Полное уничтожение ценных компонентов стеклопластика Образование вредных выбросов, загрязняющих окружающую среду Образование золы
	Газификация	Получение синтез-газа	Полное уничтожение ценных компонентов стеклопластика Экономически не выгоден для отходов стеклопластика Образование вредных выбросов, загрязняющих окружающую среду
	Пиролиз	Возможность переработки смешанных отходов ПКМ Получение жидкой и газовой фракций, сопоставимых по теплотворной способности с топливом Высокий выход волокон	Снижение механических свойств вторичных волокон из-за высокой температуры Образование углерода на поверхности волокон, уменьшающего их механические и адгезионные свойства Необходимость проведения постпиролизной обработки волокон Необходимость обезвреживания пиролизных газов, содержащих опасные вещества Неравномерность прогрева рабочей камеры реактора Невысокая эффективность теплопередачи между отходами ПКМ и горячим газом

Окончание табл.

Группа методов	Метод	Достоинства	Недостатки
Термические	Окисление в псевдоожиженном слое	Получение волокон с меньшим содержанием на их поверхности углерода по сравнению с пиролизом Получение газа, использующегося в качестве теплоносителя в самой установке Возможность обработки смешанных отходов	Снижение механических свойств вторичных волокон за счет воздействия высоких температур и частиц псевдоожиженного слоя Необходимость проведения дополнительной очистки отработанного газа
Химические	Низкотемпературный сольволиз	Проведение процесса при атмосферном давлении, способствующего меньшим экономическим затратам Простота регулирования процесса Более низкие температуры в сравнении с термическими методами, способствующие более полному сохранению механических свойств вторичных волокон	Сложность переработки смешанных отходов Малая пригодность для отходов стеклопластика из-за хрупкости волокон при воздействии растворителя Использование опасных растворителей и катализаторов, оказывающих негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду Образование токсичных газов при нагреве растворителей и катализаторов Высокое энергопотребление
	Сверхкритический сольволиз	Более полное растворение матрицы по сравнению с низкотемпературным сольволизом Использование менее агрессивных растворителей по сравнению с низкотемпературным сольволизом, оказывающих меньшее негативное воздействие на механические свойства вторичных волокон и окружающую среду	Применение дорогостоящего оборудования Высокое энергопотребление Использование растворителей и катализаторов, оказывающих негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду

Заключение. Представленный в статье обзор по проблемам утилизации отходов стеклопластика показывает, что ежегодные темпы роста производства стеклопластика существенно выше роста объемов его переработки. Ввиду ужесточения законодательства по обращению с отходами и требований к экологичной безопасности утилизация отходов стеклопластика представляет собой актуальную материаловедческую задачу.

Утилизация отходов стеклопластика на основе термореактивных смол термическими методами связана с необходимостью проведения дополнительных мероприятий по очистке образующихся вредных газообразных выбросов. С помощью методов сжигания и газификации возможно перерабатывать большие объемы отходов с получением тепловой энергии, однако, помимо указанной выше экологической проблемы, с экономической точки зрения и ресурсосбережения в ходе проведения процессов окисления происходит полное уничтожение ценных армирующих волокон, что делает процесс нерентабельным. Применение методов пиролиза и окисления в псевдоожиженном слое частично решает указанные проблемы. Вместе с тем полученные в ходе пиролиза волокна, которые на своей поверхности содержат углерод, нуждаются в дополнительной постпиролизной подготовке, что требует дополнительных энергетических и экономических затрат. Кроме того, полученные волокна ввиду воздействия относительно высоких температур подвергаются частичной деструкции, а это ухудшает их механические свойства. Окисление в псевдоожиженном слое не сопровождается образованием углерода на поверхности волокон, однако высокие температуры теплоносителя и механическое воздействие частиц псеводожиженного слоя также значительно снижают прочность вторичных волокон.

Использование химических методов утилизации, в отличие от термических, позволяет перерабатывать отходы стеклопластика при меньших температурах и с практически полным разложением матрицы. Однако серьезным препятствием к

распространению данных методов является применение в процессе агрессивных растворителей, утилизация которых требует дополнительного оборудования и затрат. Кроме того, для их использования, особенно в случае сверхкритического сольволиза, требуется разработка и производство дорогостоящих реакторов для создания определенных условий. При этом поверхность вторичных волокон при контакте с агрессивными растворителями частично разрушается, что снижает их прочностные свойства относительно первичных.

Наиболее перспективным с точки зрения соотношения экономических затрат и качества получаемых вторичных материалов является механический метод переработки стеклопластиков. В отличие от ранее перечисленных, в процессе механической переработки не образуется вредных газообразных продуктов и токсичных растворов, нуждающихся в дополнительных системах очистки. Механическая переработка отходов стеклопластика не требует использования дорогостоящего оборудования и позволяет в рамках одного технологического процесса осуществлять утилизацию больших объемов разного вида термореактивных стеклоармированных композитов.

Применение механического метода позволит решить серьезную проблему утилизации отходов стеклопластика и осуществить замкнутый цикл производства в рамках зеленой экономики. Для этого необходимым выступает проведение комплекса исследований, направленных на разработку и совершенствование известных методов измельчения стеклопластиков и классификации получаемых продуктов с возможностью извлечения вторичного волокнистого материала.

Список литературы

1. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. Т. 34, № 1. С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

2. Каблов Е. Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.

3. Преображенский А. И. Стеклопластики – свойства, применение, технологии // Главный механик. 2010. № 5. С. 27–36.

4. Вавилова М. И., Кавун Н. С. Свойства и особенности армирующих стеклянных наполнителей, используемых для изготовления конструкционных стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 33–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-33-37.

5. Бородулин А. С. Свойства и особенности структур стеклянных волокон, используемых для изготовления стеклопластиков // Материаловедение. 2012. № 7. С. 34–37.

6. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ / Р. Р. Мухаметов [и др.] // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 2. С. 38–42.

7. Термореактивные связующие и полимерные биндеры для полимерных композиционных материалов, получаемых методом вакуумной инфузии (обзор) / Л. В. Чурсова [и др.] // Пластические массы. 2018. № 1–2. С. 57–64.

8. Witten E., Mathes V. The European Market for Fibre-reinforced Plastics. Composites 2024. Market developments, trends, challenges and outlook. GmbH: AVK-TV, 2025. 37 p.

9. Using recycled waste glass fiber reinforced polymer (GFRP) as filler to improve the performance of asphalt mastics / J. Lin [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 336. P. 13. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130357.

10. Witten E. Composites Market Report 2015. Market developments, trends, outlook and challenges. GmbH: AVK-TV, 2015. 44 p.

11. Economic aspects of fiber reinforced polymer composite recycling / C. V. Amaechi [et al.] // Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. 2020. Vol. 2. P. 377–397. DOI: 10.1016/b978-0-12-803581-8.10738-6.

12. Liu P., Barlow C. Y. Wind turbine blade waste in 2050 // Waste management. 2017. Vol. 62. P. 229–240. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.007.

13. Zero–waste recycling of fiber-epoxy from scrap wind turbine blades for effective resource utilization / C. Du [et al.] // Polymers. 2022. Vol. 14, no. 24. P. 15. DOI: 10.3390/polym14245408.

14. Elsayed A., Roetger T., Bann A. Best Practices and Standards in Aircraft End-of-Life and Recycling // Environmental report aviation and environment. 2019. P. 279–284.

15. Long L., Sun S., Zhong S. Using vacuum pyrolysis and mechanical processing for recycling waste printed circuit boards // J. Hazard Mater. 2010. Vol. 177, no. 3. P. 626–632. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.12.078.

16. Liu K., Zhang Z., Zhang F. Advanced degradation of brominated epoxy resin and simultaneous transformation of glass fiber from waste printed circuit boards by improved supercritical water oxidation processes // Waste management. 2016. Vol. 56. P. 423–430. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.05.022.

17. Sustainability considerations for end-of-life fibre-reinforced plastic boats / R. Geraghty [et al.] // Regional Studies in Marine Science. 2025. Vol. 83. P. 20. DOI: 10.1016/j.rsma.2025.104054.

18. Abandonment of fibreglass reinforced plastic fishing boats in Kerala, India, and chemical emissions arising from their burning / N. M. Lekshmi [et al.] // Environ Monit Assess. 2023. Vol. 195, no. 12. P. 21. DOI: 10.1007/s10661-023-12033-8.

19. Glass reinforced plastic (grp) a new emerging contaminant – first evidence of grp impact on aquatic orga–nisms / C. Ciocan [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2020. Vol. 160. P. 22. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111559.

20. Cooperman A., Eberle A., Lantz E. Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 168. P. 10. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105439.

21. Elen M., Kumar V., Fifield L. S. Feasibility of recovering and recycling polymer composites from end-of-life marine renewable energy structures: a review // Sustainability. 2024. Vol. 16, no. 23. P. 31. DOI:10.3390/su162310515.

22. Composite material recycling technology – state-of-the-art and sustainable development for the 2020s / A. E. Krauklis [et al.] // Journal of composites science. 2021. Vol. 28, no. 5. P. 33. DOI: 10.3390/jcs5010028.

23. Successful closed-loop recycling of thermoset composites / J. Palmer [et al.] // Composites part A: applied science and manufacturing. 2009. Vol. 40, no. 4. P. 490–498. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.02.002.

24. Pickering S. J. Recycling technologies for thermoset composite materials – current status // Composites part A: applied science and manufacturing. 2006. Vol. 37, no. 8. P. 1206–1215. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.05.030.

25. Recycling approach towards sustainability advance of composite materials' industry / M. C. S. Ribeiro [et al.] // Recycling. 2016. Vol. 1. P. 178–193. DOI: 10.3390/recycling1010178.

26. Correia J. R., Almeida N. M., Figueira J. R. Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures // Journal of Cleaner Production. 2011. Vol. 19, no. 15. P. 1745–1753. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.05.018.

27. Abbasi S. A. Utilization of fiber-reinforced plastic (FRP) waste generated by a wind-turbine manufacturing company // International Journal of Engineering & Scientific Research. 2018. Vol. 6, no. 2. P. 103–129.

28. Composite Recycling: Where Are We Now? / S. Job [et al.] // Berkhamsted, Composites UK Ltd. 2016. 20 p.

29. Современные технологии переработки полимерных отходов и проблемы их использования / В. Н. Шахова [и др.] // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 11. С. 320–325.

30. Jacob A. Composites can be recycled // Reinforced Plastics. 2011. Vol. 55, no. 3. P. 45–46. DOI: 10.1016/S0034-3617(11)70079-0.

31. Kelley D. Fiberglass-reinforced plastic (FRP) equipment for treating waste incineration gases // Proceedings of the corrosion. 2004. P. 9. DOI: 10.5006/C2004-04617.

32. Базунова М. В., Прочухан Ю. А. Способы утилизации отходов полимеров // Вестник Башкирского университета. 2008. Т. 13, № 4. С. 875–885.

33. Goodship V. Management, Recycling and Reuse of Waste Composites. Cambridge: Woodhead, 2009. 624 p.

34. Thermoset composite recycling – driving forces, development, and evolution of new opportu–nities / M. Overcash [et al.] // Journal of composite materials. 2018. Vol. 52, no. 8. P. 1033–1043. DOI: 10.1177/0021998317720000.

35. Thermo-catalytic treatment of vapors in the recycling process of carbon fiber-poly (benzoxazine) composite waste by pyrolysis / N. Gastelu [et al.] // Catalysts. 2018. Vol. 8, no. 523. P. 15. DOI: 10.3390/catal8110523.

36. Asmatulu E., Twomey J., Overcash M. Recycling of fiber reinforced composites and direct structural composite recycling concept // Journal of composite materials. 2014. Vol. 48, no. 5. P. 593–608. DOI: 10.1177/0021998313476325.

37. Can thermally degraded glass fibre be regenerated for closed-loop recycling of thermosetting composites? / L. Yang [et al.] // Composites: Part A. 2015. Vol. 72, no. 5. P. 167–174. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.01.030.

38. Retracted: a critical review on recycling composite waste using pyrolysis for sustainable development / R. Abdallah [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14. P. 25. DOI: 10.3390/en14185748.

39. Nahil M. A., Williams P. T. Recycling of carbon fibre reinforced polymeric waste for the production of activated carbon fibres // Journal of analytical and applied pyrolysis. 2011. Vol. 91, no. 1. P. 67–75. DOI: 10.1016/j.jaap.2011.01.005.

40. Recycling of carbon fibre reinforced epoxy resin composites under various oxygen concentrations in nitrogen–oxygen atmosphere / J. Yang [et al.] // Journal of analytical and applied pyrolysis. 2015. Vol. 112. P. 253–261. DOI: 10.1016/j.jaap.2015.01.017.

41. Recycling and characterization of carbon fibers from carbon fiber reinforced epoxy matrix composites by a novel super-heated-steam method / K. W. Kim [et al.] // Journal of environmental management. 2017. Vol. 203. P. 872–879. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.015.

42. Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines / D. Akesson [et al.] // Journal of reinforced plastics and composites. 2012. Vol. 31, no. 17. P. 1136–1142. DOI: 10.1177/0731684412453512.

43. Charitidis J. P. Recycling of carbon fiber-reinforced composites-a review // Environmental engineering. 2024. Vol. 4, no. 4. P. 431–445. DOI: 10.48175/IJARSCT-17474.

44. Microwave-assisted recycling process to recover fiber from fiberglass polyester composites / V. T. Moraesa [et al.] // Materials Research. 2020. Vol. 22. P. 8. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2019-0389.

45. A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites / S. J. Pickering [et al.] // Composites science and technology. 2000. Vol. 60. P. 509–523. DOI: 10.1016/S0266-3538(99)00154-2.

46. Current practices in recycling and reusing of aircraft materials and equipment / M. A. Habib [et al.] // Materials circular economy. 2025. Vol. 7, no. 12. P. 36. DOI: 10.1007/s42824-025-00165-w.

47. The characterisation and reuse of glass fibres recycled from scrap composites by the action of a fluidised bed process / J. R. Kennerley [et al.] // Composites. Part A: applied science and manufacturing. 1998. Vol. 29, no. 7. P. 839–845. DOI: 10.1016/S1359-835X(98)00008-6.

48. Петров А. В., Дориомедов М. С., Скрипачев С. Ю. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2015. № 8. С. 62–73.

49. Pimenta S., Pinho S. T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: technology review and market outlook // Waste management. 2011. Vol. 31, no. 2. P. 378–392. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.09.019.

50. Oliveux G., Dandy L. O., Leeke G. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: review of technologies, reuse and resulting properties // Progress in materials science. 2015. Vol. 72. P. 61–99. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.01.004.

51. Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: state of the art / C. Morin [et al.] // The journal of supercritical fluids. 2012. Vol. 66. P. 232–240. DOI: 10.1016/j.supflu.2012.02.001.

52. Acute lung injury following exposure to nitric acid / T. K. Jayalakshmi [et al.] // Lung India. 2009. Vol 26, no. 4. P. 149–151. DOI: 10.4103/0970-2113.56354.

53. Gharde S., Kandasubramanian B. Mechanothermal and chemical recycling methodologies for the fibre reinforced plastic (FRP) // Environmental technology & innovation. 2019. Vol. 14. P. 89. DOI: 10.1016/j.eti.2019.01.005.

54. Supercritical propanol, a possible route to compo-site carbon fibre recovery: a viability study / J. R. Hyde [et al.] // Composites. Part A: applied science and manufacturing. 2006. Vol. 37, no. 11. P. 2171–2175. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.12.006.

55. Oliveux G., Bailleul J. L., Salle E. L. G. L. Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water // Composites. Part A: applied science and manufacturing. 2012. Vol. 43, no. 11. P. 1809–1818. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.06.008.

56. 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.

57. 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. Vol. 58, no. 4. P. 537–544. DOI: 0.1007/s11029-022-10048-9.

58. DMAP as an effective catalyst to accelerate the solubilization of waste fiber-reinforced plastics / A. Kamimura [et al.] // ChemSusChem. 2008. Vol. 1, no. 10. P. 845–850. DOI: 10.1002/cssc.200800151.

59. DeRosa R. L., Telfeyan E., Mayes S. Expanding the use of recycled SMC in BMCs // Plastics: Helping Grow a Greener Environment: proceedings of global plastics environmental conference, 2004. P. 371–383.

60. Bream C. E., Hornsby P. R. Comminuted thermoset recyclate as a reinforcing filler for thermoplastics. Part I: Characterisation of recyclate feed-stocks // Journal of materials science. 2001. Vol. 36. P. 2965–2975. DOI: 10.1023/A:1017962722495.

61. Recycling of composite materials / Y. Yang [et al.] // Chemical engineering and processing: process intensification. 2012. Vol. 51. P. 53–68. DOI: 10.1016/j.cep.2011.09.007.

62. Recycling of the fibrous frac-tion of reinforced thermoset composites / C. E. Kouparitsas [et al.] // Polymer composites. 2002. Vol. 23, no. 4. P. 682–689. DOI: 10.1002/pc.10468.

63. Schiebisch J. Zum recycling von faserverbundkunststoffen mit duroplastmatrix. Dissertation DSc. Augsburg, 1995. 147 p.

64. Sustainable waste recycling solution for the glass fibre reinforced polymer composite materials industry / A. C. Meira [et al.] // Construction and building materials. 2013. Vol. 45. P. 87–94. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.092.

65. Bledzki A. K., Goracy K. The use of recycled fibre composites as reinforcement for thermosets // Mechanics of composite materials. 1994. Vol. 29, no. 4. P. 352–356. DOI: 10.1007/BF00617160.

66. Petterson J., Nilsson P. Recycling of SMC and BMC in standard process equipment // Composite materials. 1994. Vol. 7, no. 1. P. 56–63. DOI: 10.1177/089270579400700105.

67. Pickering S. J. Recycling thermoset composite materials // Wiley encyclopedia of composites. 2012. Vol. 5. P. 17. DOI: 10.1002/9781118097298.weoc214.

68. Peters S. T. Handbook of composites. New York: Springer, 1998. 1118 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-6389-1.
69. Howarth J., Sada S. R., Mativenga P. T. Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite // Journal of cleaner production. 2014. Vol. 81. P. 46–50. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.06.023.

References

1. Kablov E. N. Innovative developments of the federal state unitary enterprise “VIAM” of the state research center of the russian federation for the implementation of “Strategic research on the development of materials and technologies for their implementation for the period up to 2030”. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2015, vol. 34, no. 1, pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33 (In Russian).
2. Kablov E. N. Composites: today and tomorrow. *Metally Evrazii* [Metals of Eurasia], 2015, no. 1, pp. 36–39 (In Russian).
3. Preobrazhenskij A. I. Fiberglass – properties, application, technologies. *Glavnyy mekhanik* [Chief mechanic], 2010, no. 5, pp. 27–36 (In Russian).
4. Vavilova M. I., Kavun N. S. Properties and features of reinforcing glass fillers used for the production of structural fiberglass. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2014, no. 3, pp. 33–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-33-37 (In Russian).
5. Borodulin A. S. Properties and structural features of glass fibers used for the production of fiberglass. *Materialovedeniye* [Materials science], 2012, no. 7, pp. 34–37 (In Russian).
6. Muhametov R. R., Ahmadieva K. R., CHursova L. V., Kogan D. I. New polymer binders for promising methods of manufacturing structural fibrous polymer composite materials. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2011, no. 2, pp. 38–42 (In Russian).
7. Chursova L. V., Panina N. N., Grebeneva T. A., Terekhov I. V., Doneckij K. I. Thermosetting binders and polymer binders for polymer composites obtained by vacuum infusion method (review). *Plasticheskiye massy* [Plastics], 2018, no. 1–2, pp. 57–64 (In Russian).
8. Witten E., Mathes V. The European Market for Fibre-reinforced Plastics. Composites 2024. *Market developments, trends, challenges and outlook*. GmbH, AVK-TV Publ., 2025. 37 p.
9. Lin J., Guo Z., Hong B., Xu J., Fan Z., Lu G., Wang D., Oeser M. Using recycled waste glass fiber reinforced polymer (GFRP) as filler to improve the performance of asphalt mastics. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 336. P. 13. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130357.
10. Witten E. Composites Market Report 2015. *Market developments, trends, outlook and challenges*. GmbH, AVK-TV Publ., 2015. 44 p.
11. Amaechi C. V., Agbomerie C. O., Orok E. O., Ye J. Economic aspects of fiber reinforced polymer composite recycling. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, 2020, vol. 2, pp. 377–397. DOI: 10.1016/b978-0-12-803581-8.10738-6.
12. Liu P., Barlow C.Y. Wind turbine blade waste in 2050. *Waste management*, 2017, vol. 62, pp. 229–240. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.007.
13. Du C., Jin G., Zhang L., Tong B., Wang B., Zhang G., Cheng Y. Zero–waste recycling of fiber-epoxy from scrap wind turbine blades for effective resource utilization. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 24. P. 15. DOI: 10.3390/polym14245408.
14. Elsayed A., Roetger T., Bann A. Best Practices and Standards in Aircraft End-of-Life and Recycling. E*nvironmental report aviation and environment*, 2019, pp. 279–284.
15. Long L., Sun S., Zhong S. Using vacuum pyrolysis and mechanical processing for recycling waste printed circuit boards. *J. Hazard Mater*, 2010, vol. 177, no. 3, pp. 626–632. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.12.078.
16. Liu K., Zhang Z., Zhang F. Advanced degradation of brominated epoxy resin and simultaneous transformation of glass fiber from waste printed circuit boards by improved supercritical water oxidation processes. *Waste management*, 2016, vol. 56, pp. 423–430. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.05.022.
17. Geraghty R., Graham-Jones J., Pemberton R., Summerscales J., Bray S. Sustainability considerations for end-of-life fibre-reinforced plastic boats. *Regional Studies in Marine Science*, 2025, vol. 83. P. 20. DOI: 10.1016/j.rsma.2025.104054.
18. Lekshmi N. M., Kumar S. S., Ashraf P. M, Xavier K. M., Prathish K. P., Ajay S. V., Edwin L., Turner A. Abandonment of fibreglass reinforced plastic fishing boats in Kerala, India, and chemical emissions arising from their burning. *Environ Monit Assess*, 2023, vol. 195, no. 12. P. 21. DOI: 10.1007/s10661-023-12033-8.
19. Ciocan C., Kristova P., Annels C., Derjean M., Hopkinson L. Glass reinforced plastic (grp) a new emerging contaminant – first evidence of grp impact on aquatic organisms. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, vol. 160. P. 22. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111559.
20. Cooperman A., Eberle A., Lantz E. Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 168. P. 10. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105439.

21. Elen M., Kumar V., Fifield L. S. Feasibility of recovering and recycling polymer composites from end-of-life marine renewable energy structures: a review. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 23. P. 31. DOI:10.3390/su162310515.

22. Krauklis A. E., Karl C. W., Gagani A. I., Jorgensen J. K. Composite material recycling technology – state-of-the-art and sustainable development for the 2020s. *Journal of composites science*, 2021, vol. 28, no. 5. P. 33. DOI: 10.3390/jcs5010028.

23. Palmer J., Ghita O. R., Savage L., Evans K. E. Successful closed-loop recycling of thermoset composites. *Composites. Part A: applied science and manufacturing*, 2009, vol. 40, no. 4, pp. 490–498. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.02.002.

24. Pickering S. J. Recycling technologies for thermoset composite materials – current status. *Composites. Part A: applied science and manufacturing*, 2006, vol. 37, no. 8, pp. 1206–1215. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.05.030.

25. Ribeiro M. C. S., Fiúza A., Ferreira, A., Dinis M. D. L., Castro A. C. M., Meixedo J. P., Alvim M. R. Recycling approach towards sustainability advance of composite materials' industry. *Recycling*, 2016, vol. 1, pp. 178–193. DOI: 10.3390/recycling1010178.

26. Correia J. R., Almeida N. M., Figueira J. R. Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 2011, vol. 19, no. 15, pp. 1745–1753. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.05.018.

27. Abbasi S. A. Utilization of fiber-reinforced plastic (FRP) waste generated by a wind-turbine manufacturing company. *International Journal of Engineering & Scientific Research*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 103–129.

28. Job S., Mativenga P., Shuaib N. A., Oliveux G., Leeke G. A., Pickering S. Composite Recycling: Where Are We Now? Berkhamsted, Composites UK Ltd. Publ., 2016. 20 p.

29. Shahova V. N., Vorob'eva A. A., Vitkalova I. A., Torlova A. S., Pikalov E. S Modern technologies for processing polymer waste and problems of their use. *Sovremennyye naukoyemkiye tekhnologii* [Modern high-tech technologies], 2016, no. 11, pp. 320–325 (In Russian).

30. Jacob A. Composites can be recycled. *Reinforced Plastics*, 2011, vol. 55, no. 3, pp. 45–46. DOI: 10.1016/S0034-3617(11)70079-0.

31. Kelley D. Fiberglass-reinforced plastic (FRP) equipment for treating waste incineration gases. *Proceedings of the corrosion*, 2004. P. 9. DOI: 10.5006/C2004-04617.

32. Bazunova M. V., Prochuhan Yu. A. Methods of recycling polymer waste. *Vestnik Bashkirskogo universiteta* [Bulletin of the Bashkir University], 2008, vol. 13, no. 4, pp. 875–885 (In Russian).

33. Goodship V. Management, Recycling and Reuse of Waste Composites. Cambridge, Woodhead Publ., 2009. 624 p.

34. Overcash M., Twomey J., Asmatulu E., Vozzola E., Griffing E. Thermoset composite recycling – driving forces, development, and evolution of new opportunities. *Journal of composite materials*, 2018, vol. 52, no. 8, pp. 1033–1043. DOI: 10.1177/0021998317720000.

35. Gastelu N., Lopez-Urionabarrenechea A., Solar J., Acha E., Caballero B., Lopez F., de Marco I. Thermo-catalytic treatment of vapors in the recycling process of carbon fiber-poly (benzoxazine) composite waste by pyrolysis. *Catalysts*, 2018, vol. 8, no. 523. P. 15. DOI: 10.3390/catal8110523.

36. Asmatulu E., Twomey J., Overcash M. Recycling of fiber reinforced composites and direct structural composite recycling concept. *Journal of composite materials*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 593–608. DOI: 10.1177/0021998313476325.

37. Yang L., Saez E. R., Nagel U., Thomason J. L. Can thermally degraded glass fibre be regenerated for closed-loop recycling of thermosetting composites? *Composites*. *Part A*, 2015, vol. 72, no. 5, pp. 167–174. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.01.030.

38. Abdallah R., Juaidi A., Savas M. A., Çamur H., Albatayneh A., Abdala S., Manzano-Agugliaro F. Retracted: a critical review on recycling composite waste using pyrolysis for sustainable development. *Energies*, 2021, vol. 14. P. 25. DOI: 10.3390/en14185748.

39. Nahil M. A., Williams P. T. Recycling of carbon fibre reinforced polymeric waste for the production of activated carbon fibres. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 2011, vol. 91, no. 1, pp. 67–75. DOI: 10.1016/j.jaap.2011.01.005.

40. Yang J., Liu J., Liu W., Wang J., Tang T. Recycling of carbon fibre reinforced epoxy resin composites under various oxygen concentrations in nitrogen–oxygen atmosphere. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 2015, vol. 112, pp. 253–261. DOI: 10.1016/j.jaap.2015.01.017.

41. Kim. K. W., Lee H. M., An J. H., Chung D. C., An K. H., Kim B. J. Recycling and characterization of carbon fibers from carbon fiber reinforced epoxy matrix composites by a novel super-heated-steam method. *Journal of environmental management*, 2017, vol. 203, pp. 872–879. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.015.

42. Akesson D., Foltynowicz Z., Christeen J., Skrifvars M. Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. *Journal of reinforced plastics and composites*, 2012, vol. 31, no. 17, pp. 1136–1142. DOI: 10.1177/0731684412453512.

43. Charitidis J. P. Recycling of carbon fiber-reinforced composites-a review. *Environmental engineering*, 2024. vol. 4, no. 4, pp. 431–445. DOI: 10.48175/IJARSCT-17474.

44. Moraesa V. T., Jermoloviciusb L. A., Tenorioc J. A. S., Lebraoa M. G., Lebrao G. W. Microwave-assisted recycling process to recover fiber from fiberglass polyester composites. *Materials Research*, 2020, vol. 22. P. 8. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2019-0389.

45. Pickering S. J, Kelly R. M, Kennerley J. R, Rudd C. D., Fenwick N. J. A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites. *Composites science and technology*, 2000, vol. 60, pp. 509–523. DOI: 10.1016/S0266-3538(99)00154-2.

46. Habib M. A., Subeshan B., Kalyanakumar C., Asmatulu R., Rahman M. M., Asmatulu E. Current practices in recycling and reusing of aircraft materials and equipment. *Materials circular economy*, 2025, vol. 7, no. 12. P. 36. DOI: 10.1007/s42824-025-00165-w.

47. Kennerley J. R., Kelly R. M., Fenwick N. J., Pickering S. J., Rudd C. D. The characterisation and reuse of glass fibres recycled from scrap composites by the action of a fluidised bed process. *Composites. Part A: applied science and manufacturing*, 1998, vol. 29, no. 7, pp. 839–845. DOI: 10.1016/S1359-835X(98)00008-6.

48. Petrov A. V., Doriomedov M. S., Skripachev S. Yu. Technologies for recycling polymer composite materials (review). *Trudy VIAM* [Works of VIYAM], 2015, no. 8, pp. 2–73 (In Russian).

49. Pimenta S., Pinho S. T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: technology review and market outlook. *Waste management*, 2011, vol. 31, no. 2, pp. 378–392. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.09.019.

50. Oliveux G., Dandy L. O., Leeke G. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in materials science*, 2015, vol. 72, pp. 61–99. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.01.004.

51. Morin C., Loppinet-Serani A., Cansell F., Aymonier C. Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: state of the art. *The journal of supercritical fluids*, 2012, vol. 66, pp. 232–240. DOI: 10.1016/j.supflu.2012.02.001.

52. Jayalakshmi T. K., Shah S., Lobo I., Uppe A., Mehta A. Acute lung injury following exposure to nitric acid. *Lung India*, 2009, vol. 26, no. 4, pp. 149–151. DOI: 10.4103/0970-2113.56354.

53. Gharde S., Kandasubramanian B. Mechanothermal and chemical recycling methodologies for the fibre reinforced plastic (FRP). *Environmental technology & innovation*, 2019, vol. 14. P. 89. DOI: 10.1016/j.eti.2019.01.005.

54. Hyde J. R., Lester E., Kingman S., Pickering S., Wong K. H. Supercritical propanol, a possible route to compo-site carbon fibre recovery: a viability study. *Composites. Part A: applied science and manufacturing*, 2006, vol. 37, no. 11, pp. 2171–2175. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.12.006.

55. Oliveux G., Bailleul J. L., Salle E. L. G. L. Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water. *Composites. Part A: applied science and manufacturing*, 2012, vol. 43, no. 11, pp. 1809–1818. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.06.008.

56. Procenko A. E., Petrov V. V., Procenko A. N., Lyuho I. A. Chemical recycling of glass-reinforced plastics with a thermosetting matrix in a supercritical ethanol environment. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Bulletin], 2023, no. 2, pp. 193–200. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.025 (In Russian).

57. 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, vol. 58, no. 4, pp. 537–544. DOI: 0.1007/s11029-022-10048-9.

58. Kamimura A., Yamada K., Kuratani T., Oishi Y., Watanabe T., Yoshida T., Tomonaga F. DMAP as an effective catalyst to accelerate the solubilization of waste fiber-reinforced plastics. *ChemSusChem*, 2008, vol. 1, no. 10, pp. 845–850. DOI: 10.1002/cssc.200800151.

59. DeRosa R. L., Telfeyan E., Mayes S. Expanding the use of recycled SMC in BMCs. *Plastics: Helping Grow a Greener Environment: proceedings of global plastics environmental conference*, 2004, pp. 371–383.

60. Bream C. E., Hornsby P. R. Comminuted thermoset recyclate as a reinforcing filler for thermoplastics. Part I: Characterisation of recyclate feed-stocks. *Journal of materials science*, 2001, vol. 36, pp. 2965–2975. DOI: 10.1023/A:1017962722495.

61. Yang Y., Boom R., Irion B., Heerden D. J., Kuiper P., Wit H. Recycling of composite materials. *Chemical engineering and processing: process intensification*, 2012, vol. 51, pp. 53–68. DOI: 10.1016/j.cep.2011.09.007.

62. Kouparitsas C. E., Kartalis C. N., Varelidis P. C., Tsenoglou C. J., Papaspyrides C. D. Recycling of the fibrous fraction of reinforced thermoset composites. *Polymer composites*, 2002, vol. 23, no. 4, pp. 682–689. DOI: 10.1002/pc.10468.

63. Schiebisch J. *Zum recycling von faserverbundkunststoffen mit duroplastmatrix*. Dissertation DSc. Augsburg, 1995. 147 p.

64. Meira A. C., Ribeiro M. C. S., Santos J., Meixedo J. P., Silva F. J. G., Fiuza A., Dinis M. L., Alvim M. R. Sustainable waste recycling solution for the glass fibre reinforced polymer composite materials industry. *Construction and building materials*, 2013, vol. 45, pp. 87–94. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.092.

65. Bledzki A. K., Goracy K. The use of recycled fibre composites as reinforcement for thermosets. *Mechanics of composite materials*, 1994, vol. 29, no. 4, pp. 352–356. DOI: 10.1007/BF00617160.

66. Petterson J., Nilsson P. Recycling of SMC and BMC in standard process equipment. *Composite materials*, 1994, vol. 7, no. 1, pp. 56–63. DOI: 10.1177/089270579400700105.

67. Pickering S. J. Recycling thermoset composite materials. *Wiley encyclopedia of composites*, 2012, vol. 5. P. 17. DOI: 10.1002/9781118097298.weoc214.

68. Peters S. T. Handbook of composites. New York, Springer Publ., 1998. 1118 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-6389-1.

69. Howarth J., Sada S. R., Mativenga P. T. Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite. *Journal of cleaner production*, 2014, vol. 81, pp. 46–50. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.06.023.

Информация об авторе

Федарович Евгений Геннадьевич – аспирант кафедры процессов и аппаратов химических производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: zhenya.fedorovich.1999@mail.ru

Information about the author

Fedarovich Evgeniy Gennad'yevich – Postgraduate student, the Department of Processes and Apparatus for Chemical Production. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhenya.fedorovich.1999@mail.ru

Поступила 15.05.2025