DOI 10.15593/24111678/2017.04.08
УДК 678.7:658.567.1

Ю.В. Куликова, К.О. Тукачева

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сегодня полимерные композиционные материалы (ПКМ) применяются почти во всех сферах деятельности человека. Особенно большую популярность в автомобилестроении приобрели композитные материалы, армированные углеродным волокном, или углепластики. Они масштабно применяются в производстве спортивных автомобилей и в большинстве случаев предназначены для облегчения конструкции машины. Ввиду своих высоких эстетических качеств ПКМ также применяются для тюнинга обычных автомобилей. Отходы данной сферы промышленности велики, зачастую из-за вывода из эксплуатации. Данные отходы отправляются на полигоны ТКО для захоронения. Благодаря исключительным качественным характеристикам углепластики почти не подвержены разрушению от воздействия окружающей среды. Следовательно, данные отходы отправляются на вечное захоронение на полигоны. Материал, который придает такие характеристики композитам, является дорогостоящим и ценным сырьем. Отсюда следует, что проблема утилизации ПКМ является как экономической, так и экологической. В статье описана структура композиционных конструкционных материалов. Свойства композитных материалов зависят как от армирующих волокон, так и от полимерной матрицы. Самым распространенным композитом в автомобилестроении на сегодняшний день являются углепластики. Широко используемой системой смол в углепластиках являются эпоксиды. С учетом специфических свойств ПКМ проблема утилизации носит прежде всего экологический характер. В нашей стране на сегодняшний день отсутствует применение каких-либо технологий утилизации ПКМ. Представлен обзор технологий утилизации полимерных композиционных материалов. Показаны преимущества и недостатки применяемых технологий. Выявлен наилучший метод, который представляет собой перспективное решение проблемы переработки углепластиков во вторсырье. Выводы сделаны на основе проведенной экспертной оценки технологий утилизации ПКМ.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, вторичная переработка, углеродное волокно, сольволиз, углепластик, утилизация, экспертная оценка, эпоксидные смолы.

Yu.V. Kulikova, K.O. Tukacheva

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

ANALYSIS OF RECYCLING TECHNOLOGIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Today, polymeric composite materials are used in almost all the areas of human activity. In the automotive industry especially great popularity was acquired by composite materials reinforced with carbon fiber or carbon plastics. They are widely used in the production of sports cars, and in most cases are designed to lessen the weight the of the car's construction. Due to their high aesthetic qualities, they are

also used for tuning conventional cars. Waste of this industry is rich in its quantity, often due to decommissioning. These wastes are sent to the landfills for disposal. Due to the exceptional qualitative characteristics, CFRPs are almost not a subject to destruction from the environment. Consequently, these wastes are sent in perpetual disposal to landfills. The components that give such characteristics to the composite material are expensive and valuable raw materials. Therefore the problem of polymeric composite materials (PCM) disposal is both economic and environmental. The structure of composite structural materials is described in the article. The properties of composite materials depend both on reinforcing fibers and on the polymer matrix. The most common composites in the automotive industry today are carbon plastics. The widely used system of resins in carbon plastics are epoxides. Taking into account the specific properties of PCM, the problem of utilization has, first of all, an environmental character. Today in our country there is no application of any technologies for the recycling of PCM. The review of recycling technologies of polymeric composite materials is presented. The advantages and disadvantages of the applied technologies are shown. The best method has been identified, which represents a promising solution to the problem of processing of carbon plastics into secondary raw material. Conclusions are made on the basis of the expert assessment of the technologies for the recycling of PCM.

Keywords: polymer composite material, recycling, carbon fiber, solvolysis, CFRP, utilization, expert evaluation, epoxy resins.

Введение

Стремительное развитие современной науки и техники требует соответствующего уровня развития конструкционных материалов, которые, в свою очередь, должны превосходить по своим механическим и эксплуатационным свойствам традиционные. К таким можно отнести полимерные композиционные материалы.

Сегодня полимеры и материалы на их основе уже заняли свою нишу в производственном процессе и уже успели серьезно потеснить такие конструкционные материалы, как железобетон, дерево, металл. Они используются почти во всех областях промышленности – от изготовления рыболовных удочек до корпусов ракетных двигателей. Данный материал все чаще начинают применять в тех случаях, когда никакой другой не может отвечать изменяющимся и растущим требованиям новой техники [1, 2].

Выбросы выхлопных газов и топливная экономичность транспортных средств являются двумя важными проблемами модернизации автотранспортных средств в настоящее время. Лучший способ повышения эффективности использования топлива – снижение веса транспортного средства. Одним из способов решения данной задачи является применение композиционных полимерных материалов, которые обладают рядом неоспоримых преимуществ: высокой удельной прочностью на растяжение и прочностью при сжатии, контролируемой электропроводностью, низким коэффициентом теплового расширения, устойчивостью к усталости и пригодностью для производства сложных формованных материалов. Основная доля используемых ПКМ в автомобилестроении представлена стеклопластиками и углепластиками с эпоксидной, полипропиленовой,

полиэтилентерефталатной матрицами. Если исключить традиционные материалы, такие как металл, стекло и резина, то в составе прочих компонентов на долю ПКМ приходится почти треть. Пример состава легкового автомобиля среднего класса представлен на рис. 1.

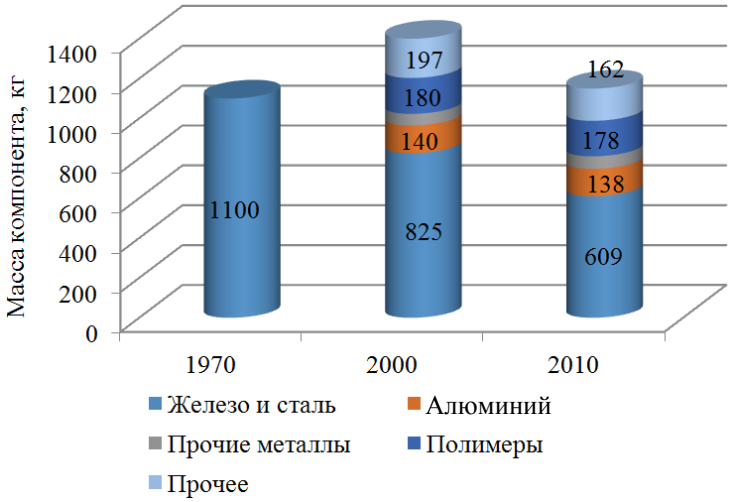


Рис. 1. Состав легкового автомобиля среднего класса [3]

Рис. 2. Пример использования углепластика в автомобилестроении [8]

Европейская директива о транспортных средствах с выработанным сроком эксплуатации (End-Of-Life Vehicle Directive) предписывает следующее: что 85 % транспортных средств по весу должны использоваться повторно или подвергаться рециклингу и 95 % транспортных средств должны использоваться повторно, подвергаться рециклингу или сжигаться с получением энергии. Самым высоким потенциалом снижения веса транспортных средств в автомобиле-

строении является полимерный композиционный материал, армированный углеродным волокном, или углепластик, однако их текущая стоимость и отсутствие жизнеспособной технологии рециклинга создают барьеры на пути его более широкого использования.

Углепластики – полимерные композиционные материалы из углеродных волокон в виде нитей, ленты, ткани, расположенных в матрице из полимерных (например, эпоксидных) смол. Данные материалы отличаются высокой прочностью, жесткостью и малой массой; зачастую они прочнее, но гораздо легче стали. По удельным характеристикам углепластики превосходят высокопрочную сталь [2, 4–6].

Полимерный композиционный армированный углеволокном материал широко используют для модернизации бамперов, спойлеров, капотов, заркал, обвесов, крыш и днищ автомобилей (рис. 2), а также в качестве тюнинга салона, например в ручке переключателя КПП, в элементах внутренних панелей, вставках руля или даже в сидениях. На сегодняшний день даже в производстве автомобилей премиум класса используют углепластики. Главная задача, которую ставят перед собой производители, – это снижение веса авто за счет деталей из углепластика. Например, у спортивных машин даже тормозные диски делают из армированного углеволокном композита. Кроме того, данный материал обладает высоким звукопоглощающим эффектом, благодаря чему применяется при производстве крышек двигателя [7, 8].

1. Структура конструкционных композитных материалов

Структура композитных материалов представляет собой комбинацию двух или более разных компонентов, физические характеристики которых могут быть различны, в результате чего получившийся конечный продукт будет обладать улучшенными характеристиками по сравнению с каждым из отдельных составляющих компонентов.

Композитные структурные материалы состоят из матрицы (полимерной, металлической или керамической), но зачастую из полимерной смолы – системы, которая инкапсулирует армирующие волокна, и одного или более армирующих наполнителей (волокон, частиц, хлопьев или наполнителей) [9]. Матрица является основой композита, она обычно более пластичная и менее жесткая. Целью этой матрицы является связывание армирующих волокон вместе и перенос на них внешних нагрузок, создающих материал, имеющий структуру. Кроме

того, для получения каких-либо дополнительных свойств материала могут быть добавлены наполнители и добавки. Армирующий слой внедрен в матрицу и иногда носит название усиливающего слоя.

Механические характеристики армированных углеродным волокном полимерных композитов сильно зависят от нескольких факторов: наличия дефектов, силы связывания между углеродным волокном и смолой, содержания углеродного волокна и его распределения в термопластичной смоле. Волоконно-матричная межфазная адгезия играет важную роль в определении механических свойств ПКМ. Учеными было обнаружено, что наилучшая межфазная адгезия проявляется в композите, армированном волокном [10–12].

К наиболее часто используемым в промышленности наполнителям можно отнести углеродные, стеклянные, борные и органические волокна; системы смол включают в себя термопластичные и термореактивные смолы. Как показано на рис. 3, армирующие волокна имеют исключительную прочность, жесткость и подвергаются упругой деформации (хрупкой) под нагрузкой на внешнюю сторону, тогда как системы смол имеют слабую прочность, жесткость и подвергаются пластической деформации (вязкой). Таким образом, свойства композитных конструкционных материалов зависят как от армирующих волокон, так и от полимерной матрицы и определяются:

– механическими свойствами армирующих волокон;

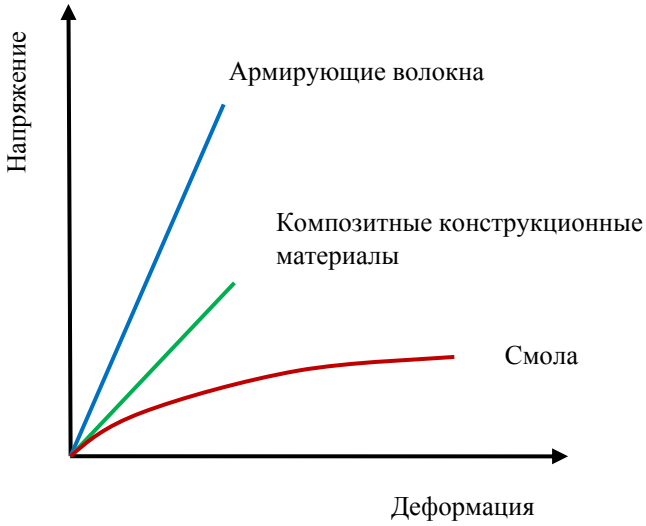


Рис. 3. График соотношения напряжений и деформаций для композиционных материалов и их компонентов, подвергающихся испытанию на растяжение

– механическими свойствами полимерной матрицы;

– коэффициентом объемности между армирующими волокнами и матрицей смолы;

– геометрией и ориентацией армирующих волокон;

– межфазной адгезией между армирующими волокнами и матрицей смолы.

Системы смол, используемые в конструкционных композитах, требуют адекватных механических, адгезионных и вязких свойств, а также стойкости к ухудшению состояния окружающей среды. Двумя основными типами систем смолы являются термопласты и реактопласты. При нагревании термопласты размягчаются и в конечном счете расплавляются, снова твердеют при охлаждении. Теоретически плавление и упрочнение могут повторяться сколько угодно без оказания каких-либо побочных эффектов на свойства материала [2, 4–6].

Реактопласты отличаются от термопластов тем, что они требуют отверждения, заставляя полимерные цепи связываться и затвердевать. Отверждение происходит, когда смола и отвердитель или смола и катализатор смешиваются вместе и подвергаются необратимой химической реакции. После отверждения реактопласты при нагревании повторно плавиться не будут. При температуре выше температуры стеклования механические свойства полимерного связующего значительно изменяются, так как молекулярная структура меняется от молекулярного состава жесткого кристаллического полимера до более гибкого аморфного полимера. Данный процесс приводит к резкому падению жесткости смолы. Наиболее распространенные термореактивные соединения включают ненасыщенные сложные полиэфиры, эпоксидные смолы, сложные виниловые эфиры и фенольные растворы.

Эпоксиды на сегодняшний день являются наиболее широко используемой системой смол, составляющей более 90 % всех углеволоконных армированных пластмасс. Они превосходят большинство других полимерных систем с точки зрения механических и адгезионных свойств, а также стойкости к ухудшению состояния окружающей среды. Пример химической структуры эпоксидной смолы и механизма ее отверждения представлен на рис. 4.

Растущее использование термореактивных композитов с углеродным волокном в аэрокосмической промышленности и автомобилестроении привело к значительному росту количества отходов производства и отходов изделий, выведенных из эксплуатации.

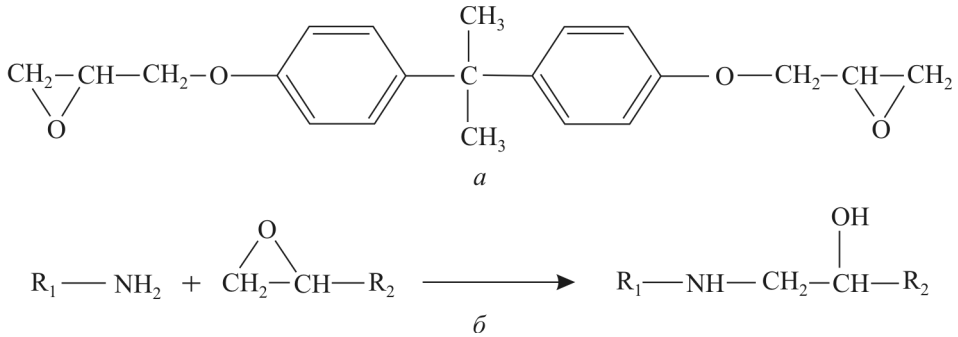


Рис. 4. Химическая структура эпоксидной смолы и механизм ее отверждения: *а* – диглицидиловый эфир бисфенола-А; *б* – реакция присоединения амина к эпоксигруппам

В настоящее время подавляющее большинство композитных отходов в нашей стране направляется на полигоны. С целью уменьшения накопления отходов на свалках видится лишь один путь решения данной проблемы – это вторичная переработка ПКМ для извлечения потенциально ценных углеродных волокон [10, 13].

По этим причинам вторичная переработка является не только экономически целесообразным, но и экологически предпочтительным решением проблемы утилизации композиционных материалов в условиях современного законодательства. Однако у данного метода есть свои минусы ввиду того, что переработка ПКМ, армированных непрерывным волокнистым наполнителем, представляет особую сложность.

Целью обзора являются анализ существующих методов утилизации ПКМ, выявление их преимуществ и недостатков и определение перспективного метода или подхода к утилизации ПКМ.

2. Методы утилизации армированных ПКМ

Все существующие методы утилизации армированных ПКМ направлены на разрушение связующего вещества с целью выделения волоконного наполнителя. Существуют следующие методы утилизации: физические, химические и термические (рис. 5) [10].

Физические методы утилизации. Среди них наибольшую популярность и распространенность приобрел именно механический метод (рис. 6) ввиду своей универсальности и сравнительной простоты технологического оформления. При использовании данного метода для утилизации углепластиков происходит одновременная переработка углеродного волокна и полимерного связующего, а также отсутствуют

вредные выбросы и испарения. Вышеперечисленные аспекты можно считать преимуществами данной технологии. К минусам же механического метода утилизации будут относиться высокая энергоемкость, необезвреженное полимерное связующее, трудности в регулировании размеров дробленых пластиков, ограниченное вторичное применение переработанных материалов [14–16].

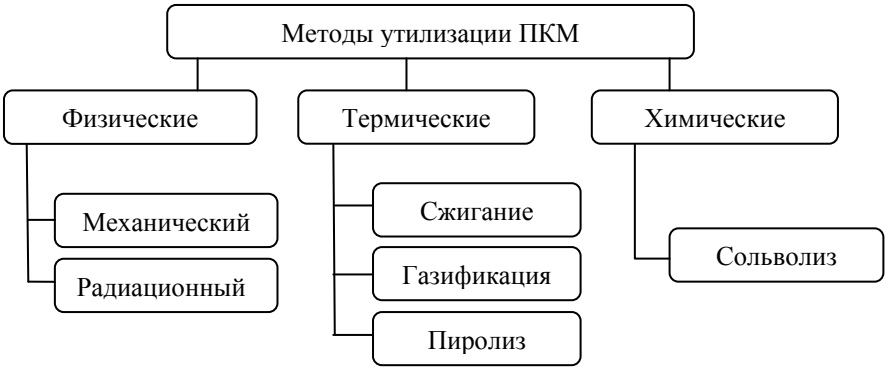


Рис. 5. Методы утилизации
полимерных композиционных материалов [10]

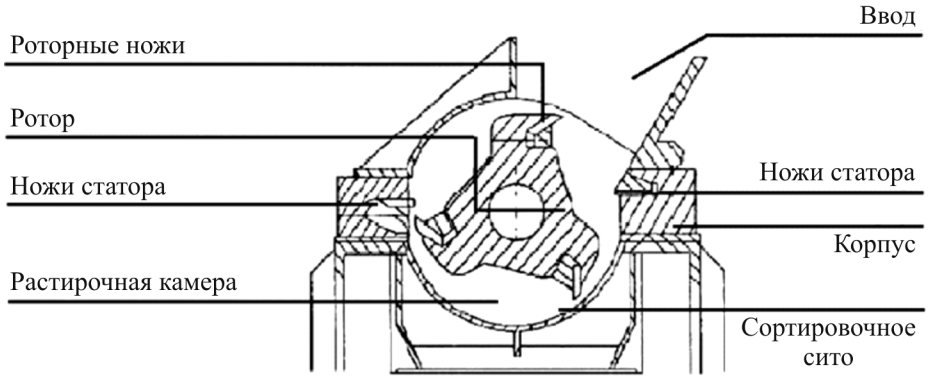


Рис. 6. Схема измельчителя для полимерных композиционных материалов

Механическая утилизация ПКМ, армированного углеволокном, как правило, фокусируется на механическом шлифовании отвержденного композитного материала. После соответствующего уменьшения размера материала его измельчают в молотковой мельнице (или аналогичной) и сортируют на различные фракции. Этот подход является экономически сложным, так как трудно производить мелкозернистый рециклинг по стоимости, сопоставимой с используемыми в настоящее время наполнителями.

На втором месте после механического стоит радиационный метод. Его преимуществами являются универсальность и энергоэффективность в области утилизации армированных пластиков. Принцип работы данного метода заключается в воздействии высокоэнергетического излучения на углепластики, которое, в свою очередь, разрушает полимерную матрицу композита, не изменяя физических характеристик наполнителя (рис. 7). К минусам можно отнести избыточную радиационную нагрузку на человека и окружающую среду, возможность утилизации в основном отходов тонкослойных ПКМ [16].

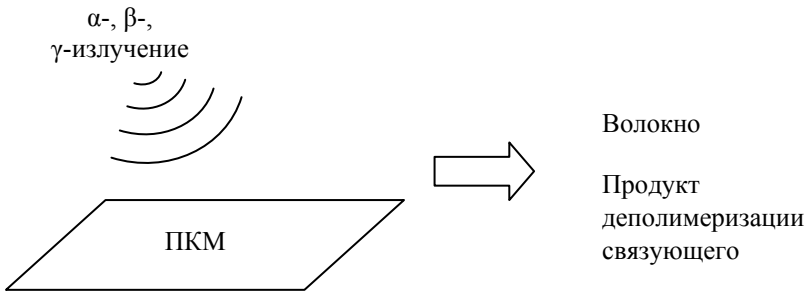


Рис. 7. Условная схема принципа действия радиационного метода на ПКМ

Термические методы утилизации. Деполимеризация и статистическая фрагментация цепей, как правило, два механизма деградации полимеров. Скорость и степень разложения могут контролироваться изменениями массы и молекулярной массы, обнаружением и количественной оценкой изменения энтальпии реакции разложения, количественным анализом побочных продуктов реакции. Фактором, ограничивающим термостабильность полимера, является прочность самой слабой связи в полимерной цепи. Термическая деградация полимеров может следовать тремя основными путями: устранением побочных групп, случайным расщеплением и деполимеризацией [15, 16].

Механизмы термической деструкции полимеров классифицируются по содержанию кислорода:

1) сжигание (количество кислорода, близкое или превышающее стехиометрическое значение);

2) газификация (недостаток кислорода);

3) пиролиз (отсутствие кислорода).

Сжигание чего-либо подразумевает процесс ликвидации объекта сжигания. В качестве метода, применяющегося для утилизации ПКМ,

в частности углепластика, оно будет нецелесообразно, ввиду того что единственным продуктом рециклинга будет являться тепло.

Пиролиз разрушает органический материал до мельчайших частиц при высоких температурах, часто повреждая волокно в процессе или оставляя на нем включения. Оба этих эффекта ограничивают возможности повторного использования восстановленного материала. Этот процесс также требует больших усилий по очистке от газа. Стоимость очистки отходящих газов при пиролизе превышает стоимость самого пиролиза.

Еще одним термическим методом утилизации армированных композитов является метод газификации. Данный процесс заключается в деструкции ПКМ с получением синтез-газа, который используется для вырабатывания тепловой и электрической энергии. Минусы данного метода схожи с минусами процесса сжигания и заключаются в загрязнении атмосферы при вероятности выбросов и разрушении наиболее ценных составляющих ПКМ.

Многие проекты по рециркуляции углепластиков сосредоточены вокруг частичного процесса пиролиза, где смоляная матрица сжигается с ограниченным кислородом. Углеродные волокна, обработанные таким образом, сохраняют 90 % или более своих первоначальных механических свойств [17–19].

Химические методы утилизации. Сольволиз состоит из химической переработки ПКМ с использованием растворителей по отношению к полимерной матрице. Первоначально технология была предложена 40 лет назад и применялась в отношении ПКМ на основе ПЭТ как одного из наиболее широко используемых термореактивных смол. Гидролиз при температуре 220–275 °C с добавлением или без добавления растворителя или катализатора использовали в 1980-х гг. с целью разложения указанного ПКМ на мономеры (карбоновые кислоты и гликоли) и сополимер стиролфумаровой кислоты [10, 20].

С тех пор было испытано много различных условий и растворителей для рециркуляции композитов из термопластов, термореактивных материалов. Сольволиз может быть реализован с использованием широкого диапазона растворителей, температур, давлений и катализаторов. Его преимущество, по сравнению с пиролизом, заключается в том, что для разрушения полимеров обычно необходимы более низкие температуры, в частности для эпоксидов. Однако, когда применяются критические условия, например с использованием в качестве разру-

шающего агента воды, реакторы, предназначенные для проведения процесса, могут стать дорогими, поскольку они должны выдерживать высокие температуры и давления, уровень коррозии вследствие модификации в таких условиях свойств растворителей. Активный растворитель, иногда в смеси с сорастворителем или с совместно реагирующим растворителем, диффундирует в композит и разрушает конкретные связи. Таким образом, можно извлечь мономеры из смолы и избежать образования кокса. В течение последнего десятилетия этот метод наиболее интенсивно используется для рециклинга композитов, в частности углепластика, поскольку восстановление углеродных волокон представляет коммерческий интерес.

Установлено, что процесс сольволиза позволяет удалить до 90 % смолы, в результате чего образуются восстановленное волокно и жидкая фракция (химическое вещество), состав которой имеет потенциальную коммерческую ценность (в частности, содержит такие вещества, как бензойную кислоту, бензальдегид, изопропилфенилкетон, метилэтиловый эфир, метилизобутиловый эфир, бензол и ацетальдегид) [10, 20]. Условная схема процесса утилизации армированных ПКМ методом сольволиза представлена на рис. 8.

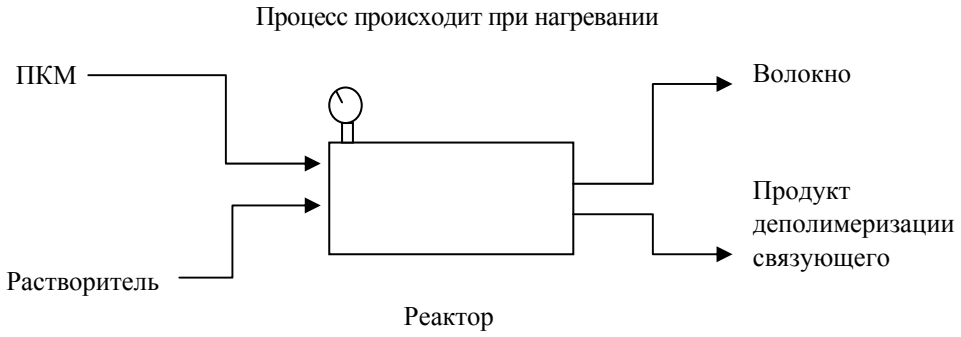


Рис. 8. Условная схема утилизации ПКМ методом сольволиза

Сольволиз низкотемпературный обычно проводят при температуре ниже 200 °С при атмосферном давлении. Для обеспечения разложения смолы в этом случае необходимы катализаторы и добавки, поскольку температура очень низкая, а также интенсивное перемешивание. В основном используется кислотная среда (азотная, серная и уксусная кислоты), в то время как при высокотемпературном сольволизе чаще применяется щелочная среда [10, 20].

Некоторые растворы кислот очень сильны и могут быть крайне опасными с точки зрения безопасности здоровья человека и окружающей среды. Единственным преимуществом этого метода является то, что при его реализации лучше контролируются происходящие реакции и, поскольку температура низкая, вторичных реакций практически не происходит. Это позволяет повысить долю извлечения эпоксидных мономеров, но, как правило, без молекул отверждающего агента.

Следует отметить, что используемые растворители для низкотемпературного сольволиза достаточно сложно подвергаются утилизации после использования.

Особенностью утилизации армированных ПКМ методом сольволиза является требование химической инертности наполнителя к реагентам, а следовательно, утилизации поддаются только углепластики и некоторые виды стеклопластиков. Композиты, содержащие другие наполнители, необходимо проверять на химическую стойкость к выбранным реагентам.

3. Анализ технологий утилизации полимерных композиционных материалов методом экспертных оценок

Исследователями А.В. Петровым и М.С. Дориомедовым в 2015 г. был проведен анализ технологий утилизации ПКМ с различными армирующими наполнителями [10]. На основании их работ был разработан алгоритм, согласно которому была проведена экспертная оценка технологий методом парного сравнения по выявлению наилучшего метода утилизации ПКМ, армированных углеволокном. Матрица попарного сравнения, согласно которой проводился анализ критериев, представлена на рис. 9. Алгоритм проведения экспертной оценки приведен на рис. 10.

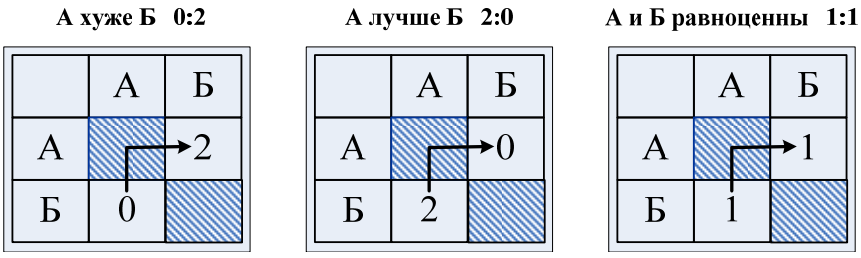


Рис. 9. Матрица парных сравнений

Анализ производился по следующим критериям:

1 – сохранение механических свойств углеволокна на допустимом уровне;

2 – возможность использования деполимеризованного остатка;

3 – энергоэффективность технологии;
4 – возможность вторичного использования продуктов утилизации;
5 – экологическая безопасность.

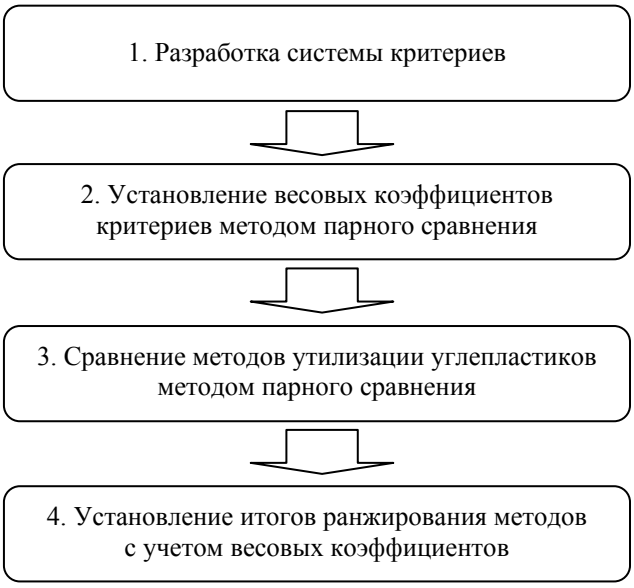


Рис. 10. Алгоритм проведения экспертной оценки технологий

Данные критерии были проранжированы с применением метода парного сравнения, были получены коэффициенты для дальнейшего выбора наилучшего метода утилизации углепластиков.

В табл. 1 представлены результаты сравнительного анализа.

Таблица 1

Сравнение способов утилизации ПКМ методом экспертной оценки

Критерии	Пиролиз	Сольволиз	Измельчения	Радиационный
1 – сохранение механических свойств углеволокна на допустимом уровне (0,33)	5 (1,67)	5 (1,67)	2 (0,67)	4 (1,33)
2 – возможность использования деполимеризованного остатка (0,06)	2 (0,67)	5 (1,67)	3 (1,00)	2 (0,67)
3 – энергоэффективность технологии (0,11)	4 (1,33)	5 (1,67)	3 (1,00)	4 (1,33)

Окончание табл. 1

Критерии	Пиролиз	Сольволиз	Измельчения	Радиационный
4 – возможность вторичного использования продуктов утилизации (0,22)	5 (1,67)	5 (1,67)	5 (1,67)	4 (1,33)
5 – экологическая безопасность (0,28)	5 (1,67)	3 (1,00)	5 (1,67)	2 (0,67)
Сумма	21	23	18	16
Сумма с учетом *k*	7,00	7,67	6,00	5,33

По результатам анализа был выявлен наиболее предпочтительный метод утилизации ПКМ, армированного углеволокном, для дальнейшей постановки эксперимента. На рис. 11 приведен график с получившимися результатами.

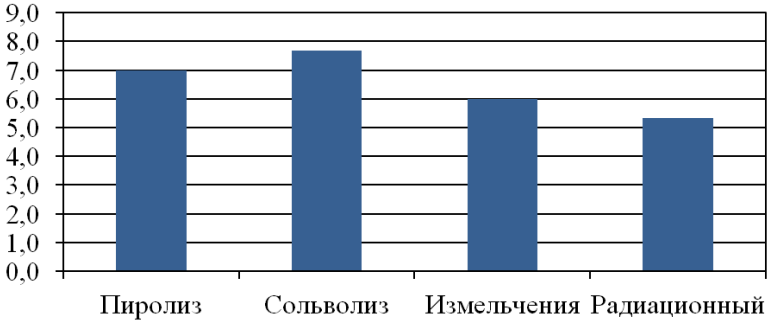


Рис. 11. График ранжирования методов утилизации ПКМ

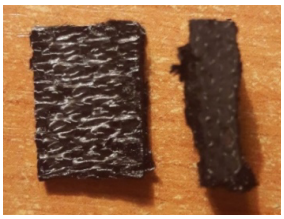
На основании данных проведенного анализа можно увидеть, что для сохранения свойств наполнителя для углепластиков и его вторичного использования наиболее предпочтительной технологией будет являться метод сольволиза, на втором же месте находится пиролиз.

Пиролиз и сольволиз являются наиболее предпочтительными методами переработки ПКМ, в частности углепластиков. Оба метода направлены на регенерацию волокон, требуют предварительного измельчения или дробления до кусков приемлемого размера. При их реализации возможно восстановление углеродных волокон, которые в основном сохраняют свою армирующую способность, тогда как стекловолокно сильно подвержено охрупчиванию.

Для оценки возможности реализации указанных методов были проведены предварительные испытания по извлечению вторичного углеволокна в процессе сольволиза и пиролиза. Условия проведения процесса и предварительные результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Условия проведения и результаты предварительных испытаний по извлечению вторичного углеволокна из состава ПКМ

№ п/п	Условия проведения	Результаты/исходный материал
1	Исходный углепластик марки УТЗФ «Урал»	
2	Сольволиз при температуре 120–140 °С с добавлением неорганических окисляющих агентов и катализаторов. Материал – углепластик «Урал»	Высокая степень чистоты волокон
3	Окислительный пиролиз при температуре 450–550 °С с добавлением катализаторов	Волокна имеют загрязнение пироуглеродом, отмечена существенная активация

Было установлено, что, по сравнению с пиролизом, сольволиз позволяет избежать образования кокса, который загрязняет волокно. Полунепрерывные условия обеспечивают получение чистых волокон без использования окислителей, в противном случае после промывки требуется удалить органический остаток, который остается на волокнах во время фазы охлаждения в реакторах периодического действия. Волокна, выделенные методом сольволиза, могут быть более чистыми, чем волокна, полученные путем пиролиза, но это зависит от используемых условий (окислитель, очень кислая или щелочная среда). Когда волокна сплетены в композитный материал, то, по-видимому, труднее удалить смолу пиролизом, в частности между двух пересекающихся волокон.

Выводы

1. Серьезной проблемой широкого применения ПКМ является утилизация, поскольку создание и внедрение новых материалов непременно приводят к образованию отходов. С учетом специфических свойств ПКМ, таких как стойкость к внешним воздействиям окружающей среды, проблема их утилизации носит прежде всего экологический характер. Особую сложность представляет собой утилизация ПКМ, армированных непрерывными волокнистыми наполнителями, вследствие их высоких прочностных характеристик и проблем вторичного использования утилизированных отходов.

2. По прогнозам, к 2020 г. в России общий объем производства ПКМ возрастет до 118 тыс. т, а их потребление на душу населения увеличится с 0,3 кг/чел. (2012 г.) до 0,8 кг/чел. Несмотря на то что производство композитов идет полным ходом, в нашей стране на сегодняшний день отсутствует применение каких-либо технологий утилизации ПКМ.

3. Все способы утилизации армированных ПКМ нуждаются в разрушении матрицы (связующего), чтобы выделить армирующий наполнитель (волокно) с получением на выходе различных продуктов переработки. В настоящее время условно рассматривают три вида методов утилизации: физические, химические и термические.

4. Проведен анализ существующих способов переработки композитов методом экспертной оценки. Определены весовые коэффициенты критериев оценки. Наилучшей технологией на основании критериев с учетом весовых коэффициентов был признан метод сольволиза.

Результаты, представленные в статье, получены в ходе выполнения государственного задания Министерства образования и науки РФ в рамках мероприятия «Инициативные научные проекты», код заявки 5.9729.2017/8.9.

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. – № 1. – С. 3–33.

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

3. Pick'n'mix: the evolution of automotive materials. – URL: https://www.automotiveworld.com/analysis/picknmix-evolution-automotive-materials (дата обращения: 12.10.2017).

4. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов, В.Н. Кириллов // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 11. – С. 19–27.

5. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ / В.Н. Кириллов, В.А. Ефимов, А.К. Шведкова, Е.В. Николаев // Авиационные материалы и технологии. – 2011. – № 4. – С. 41–45.

6. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № S. – С. 412–423.

7. Региональный центр автотехнической экспертизы [Электронный ресурс]. – URL: http://www.avtoexpert.pro/detali-avtomobilya-iz-karbona-osnovnye-preimushhestva (дата обращения: 09.09.2017).

8. Carbonworks. – URL: http://carbonworks.ru (дата обращения: 09.09.2017).

9. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях [Электронный ресурс] // Тр. ВИАМ. – 2013. – № 8. – Ст. 03. – URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=123 (дата обращения: 20.08.2017).

10. Петров А.В., Дориомедов М.С., Скрипачев С.Ю. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) [Электронный ресурс] // Тр. ВИАМ. – 2015. – № 12. – Ст. 12. – URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=904 (дата обращения: 21.08.2017).

11. Нелюб В.А. Влияние шероховатости поверхности углеродных волокон на свойства углепластиков // Химические волокна. – 2014. – № 5. – С. 30–35.

12. Kennerley J. Recycling fibres recovered from composite materials using a fluidised bed process. – University of Nottingham, 1998. – URL: http://eprints.nottingham.ac.uk/12849/1/263409.pdf (дата обращения: 04.10.2017).

13. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Принципы «зеленой химии» в перспективных технологиях изготовления изделий из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № S2. – С. 24–28.

14. 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.

15. Palmer J. Mechanical recycling of automotive composites for use as reinforcement in thermoset composites. – University of Exeter, 2009. – URL: https://ore.exeter.ac.uk (дата обращения: 12.09.2017).

16. Mechanical properties of ABS resin reinforced with recycled CFRP / K. Ogi, T. Nishikawa, Y. Okano, I. Taketa // Advanced Composite Materials. – 2007. – Vol. 16, № 2. – P. 181–194.

17. Pickering S.J. Recycling technologies for thermoset composite materials – current status // Composites: Part A. – 2006. – Vol. 37. – P. 1206–1215.

18. Daniel L.P., Sovinski M.F. Determination of fiber volume in carbon/cyannate ester composites using thermogravimetric analysis (TGA), NASA/TM–2006–214143.

19. Successful closed-loop recycling of thermoset composites / J. Palmer, O.R. Ghita, L. Savage, K.E. Evans // Composites: Part A. – 2009. – Vol. 40. – P. 490–498.

20. Conroy A., Halliwell S., Reynolds T. Composite recycling in the construction industry // Composites: Part A. – 2006. – Vol. 37. – P. 1216–1222.

References

1. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskih napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative developments of FSUE «VIAM» of the SSC RF for the implementation of «Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030»]. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no 1, pp. 3–33.

2. Kablov E.N. Kompozity: segodnja i zavtra. [Composites: today and tomorrow]. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36-39.

3. Pick'n'mix: the evolution of automotive materials available at: https://www.automotiveworld.com/analysis/picknmix-evolution-automotive-materials/ (accessed 12 October 2017).

4. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticheskoe starenie kompozicionnyh materialov aviacionnogo naznachenija. I. Mehanizmy starenija [Climate aging of aviation-grade composite materials. I. Mechanisms of aging]. *Deformacija i razrushenie materialov,* 2010, no 11, pp. 19–27.

5. Kirillov V.N., Efimov V.A., Shvedkova A.K., Nikolaev E.V. Issledovanie vlijanija klimaticheskih faktorov i mehanicheskogo nagruzhenija na strukturu i mehanicheskie svojstva PKM [Investigation of the influence of climatic factors and mechanical loading on the structure and mechanical properties of PCM]. *Aviacionnye materialy i tehnologii,* 2011, no 4, pp. 41–45.

6. Kirillov V.N., Starcev O.V., Efimov V.A. Klimaticheskaja stojkost' i povrezhdaemost' polimernyh kompozicionnyh materialov, problemy i puti reshenija [Climatic stability and damageability of polymer composite materials, problems and solutions]. *Aviacionnye materialy i tehnologii,* 2012, no S, pp. 412–423.

7. Regional'nyj Centr Avtotehnicheskoj Jekspertizy [Regional Center for Automotive Expertise], available at: http://www.avtoexpert.pro/detali-avtomobilya-iz-karbona-osnovnye-preimushhestva (accessed 9 September 2017)

8. Carbonwork, available at: http://carbonworks.ru/ (accessed 9 September 2017).

9. Vlasenko F.S., Raskutin A.E. Primenenie polimernyh kompozicionnyh materialov v stroitel'nyh konstrukcijah [Application of polymeric composite materials in building structures]. *Trudy VIAM,* 2013, no 8, vol. 3 – available at: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=123 (accessed 20 August 2017).

10. Petrov A.V., Doriomedov M.S., Skripachev S.Ju. Tehnologii utilizacii polimernyh kompozicionnyh materialov (obzor) [Technologies for utilization of polymer composite materials]. *Trudy VIAM,* 2015, no. 12, 12 p., available at: http://viam-works.ru/ru/arti-cles? art_id=904 (accessed 21 August 2017).

11. Neljub, V.A. Vlijanie sherohovatosti poverhnosti uglerodnyh volokon na svojstva ugleplastikov [Influence of the surface roughness of carbon fibers on the properties of carbon plastics]. *Himicheskie volokna,* 2014, no. 5, pp. 30-35.

12. Kennerley J. Recycling Fibres Recovered from Composite Materials using a Fluidised Bed Process. University of Nottingham, 1998, available at: http://eprints.nottingham.ac.uk/12849/1/263409.pdf (accessed 4 October 2017).

13. Doneckij K.I., Hrul'kov A.V. Principy «zelenoj himii» v perspektivnyh tehnologijah izgotovlenija izdelij iz PKM [Principles of «green chemistry» in advanced technologies for manufacturing products from PCM]. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S2, pp. 24–28.

14. 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.

15. Palmer J. Mechanical recycling of automotive composites for use as reinforcement in thermoset composites. University of Exeter, 2009, available at: https://ore.exeter.ac.uk. (accessed 12 September 2017)

16. Ogi K., Nishikawa T., Okano Y., Taketa I. Mechanical properties of ABS resin reinforced with recycled CFRP. *Advanced Composite Materials,* 2007, vol. 16, no. 2, pp. 181–194.

17. Pickering S.J. Recycling technologies for thermoset composite materials – current status. *Composites: Part A*, 2006, vol. 37, pp. 1206–1215.

18. Daniel L.P., Sovinski M.F. Determination of fiber volume in carbon/cyannate ester composites using thermogravimetric analysis (TGA), NASA/TM–2006–214143.

19. Palmer J., Ghita O.R., Savage L., Evans K.E. Successful closed-loop recycling of thermoset composites. Composites: Part A, 2009, vol. 40, pp. 490–498.

20. Conroy A., Halliwell S., Reynolds T. Composite recycling in the construction industry. *Composites. Part A*, 2006, vol. 37, pp. 1216–1222.

Получено 08.11.2017

Об авторах

Куликова Юлия Владимировна (Пермь, Россия) – доцент кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kulikova.pnipu@gmail.com).

Тукачева Ксения Олеговна (Пермь, Россия) – магистр кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ksyusha118@yandex.ru).

About the authors

Yuliia V. Kulikova (Perm, Russian Federation) – Associate Professor, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: kulikova.pnipu@gmail.com).

Kseniia O. Tukacheva (Perm, Russian Federation) – Master, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ksyusha118@yandex.ru).