

УДК 504:539.422.53
AGRIS P01

<http://doi.org/10.5281/zenodo.2253382>

ТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ И УНИЧТОЖЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

©**Тукачева К. О.**, SPIN-код: 9637-2343, ORCID: 0000-0002-5800-7083,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия, ksyusha118@yandex.ru

©**Ильиных Г. В.**, SPIN-код: 2995-4576, ORCID: 0000-0002-8829-3500, канд. техн. наук,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия, alina.perm.59@yandex.ru

©**Слюсарь Н. Н.**, SPIN-код: 6624-9670, ORCID: 0000-0003-0123-6907, канд. техн. наук,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия, nnslyusar@gmail.com

THERMAL TREATMENT AND DISPOSAL OF CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITES

©**Tukacheva K.**, SPIN-code: 9637-2343, ORCID: 0000-0002-5800-7083,
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, ksyusha118@yandex.ru

©**Ilinykh G.**, SPIN-code: 2995-4576, ORCID: 0000-0002-8829-3500, Perm National Research
Polytechnic University, Perm, Russia, galina.perm.59@yandex.ru

©**Slyusar N.**, SPIN-code: 6624-9670, ORCID: 0000-0003-0123-6907, Perm National Research
Polytechnic University, Perm, Russia, nnslyusar@gmail.com

Аннотация. С точки зрения рационального природопользования утилизация полимерных композиционных материалов — это одновременно и предотвращение загрязнения окружающей среды при их захоронении и возможность вернуть в хозяйственный оборот ценные ресурсы — волокна и другие наполнители. В данной статье представлен анализ различных процессов термической утилизации полимерных композиционных материалов на основе углеродных волокон. Технологии сжигания в специализированных установках и в печах цементного производства позволяют уничтожать значительные объемы самых разнообразных отходов, в том числе полимерных композиционных материалов, с полезным использованием их энергетического потенциала, поэтому является популярным способом решения проблемы таких материалов так, где их захоронение запрещено. Однако при этом теряется ценный ресурс — углеродное волокно, изготовление которого требует значительных энергетических затрат. Поэтому приоритетными являются технологии, позволяющие извлекать вторичное углеродное волокно. Одним из наиболее широко используемых методов, соответствующим большинству требований, является пиролиз, поэтому подбор оптимальных условий этого процесса — актуальная задача для исследований.

Abstract. From the point of view of rational resource management polymer composites treatment is at the same time environmental pollution prevention during their burial and the opportunity to recover valuable resources — fibers and other fillers. This article presents an analysis of the various processes of thermal utilization of carbon fiber reinforced composites.

Incineration technologies in specialized installations and in cement production kilns allow to get rid of the significant amounts of a wide variety of wastes, including polymer composites, with useful energy potential, therefore, it is a popular way to solve the problem of such materials in a place where their disposal is prohibited. However, in this case valuable resources, like carbon fiber, which production is very energy-consuming, are lost. Therefore, the priority are technologies that allow recycled carbon fiber recovery. One of the most widely used methods that meets most requirements is pyrolysis; therefore, investigation of optimal conditions for this process is an urgent task for research.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, углеродное волокно, утилизация, термические методы утилизации, пиролиз.

Keywords: polymer composite material, carbon fiber, utilization, thermal methods of utilization, pyrolysis.

Введение

Композитные материалы на основе смол и волокон все чаще используются для замещения металлов при изготовлении промышленных объектов, спортивных товаров и транспортных средств. Однако в отличие от металлов, одной из самых больших проблем, связанных с армированными композитами, является их утилизация. В связи с ужесточением экологического законодательства и быстрым ростом объемов использования полимерных композиционных материалов (ПКМ) необходима разработка эффективных решений по утилизации композитов, в том числе с учетом принципов рационального природопользования и экономии ресурсов. Захоронение ПКМ на полигонах ТКО является относительно дешевым способом обращения с такими отходами, но является наименее предпочтительным вариантом в соответствии принципами устойчивого развития и безотходного производства [1].

Несмотря на то, что изделия из ПКМ на основе углеродных волокон (углепластики) производятся достаточно давно, их утилизация становится особенно актуальной только сейчас, так как срок эксплуатации таких изделий обычно достаточно длителен (20-25 лет). Проблема обращения с отслужившими свой срок ПКМ будет только усугубляться со временем, так как объемы производства ПКМ на основе углеродных волокон удваиваются каждые 5-7 лет [2]. Ужесточение законодательства в области обращения с отходами также направлено на стимулирование развития технологий повторного применения материалов.

Углепластики — достаточно дорогостоящие материалы в первую очередь за счет высокой стоимости углеродного волокна, производство которого очень энергозатратно. Поэтому извлечение и применение вторичного углеродного волокна — одно из приоритетных направлений развития системы обращения с такими отходами. Все направления утилизации ПКМ, армированных углеволокном, можно условно разделить на три большие группы: физические, химические и термические методы [2]. Наличие органических компонентов в составе ПКМ на основе углеродных волокон позволяет рассматривать термические методы как возможное и перспективное направление утилизации.

Методы утилизации, которые подходят для применения в промышленном масштабе, должны отвечать сразу нескольким требованиям, среди которых низкие капитальные и эксплуатационные затраты и получение вторичных материалов хорошего качества. Термические методы в настоящее время отвечают данным требованиям и являются наиболее широко используемыми в применяемом промышленном оборудовании.

В рамках данной работы был проведен анализ современных методов термической утилизации полимерных композитных материалов, армированных углеволокном [3, 4]. Кроме того, в лабораторных условиях были апробированы различные режимы утилизации углепластиков методом пиролиза.

Основные технологии термической обработки углепластиков

Термическая обработка ПКМ предполагает их обработку при достаточно высоких температурах, иногда с рекуперацией волокон и получением топлива, и реализуются в различном процессном исполнении [5-15]. Данные методы позволяют извлекать волокна, которые в дальнейшем могут быть повторно использованы в качестве армирующих наполнителей в новых материалах. Но не всегда они позволяют извлечь ценные продукты из связующего вещества (то есть мономеры, которые могут быть повторно использованы для получения смол). В процессе термической утилизации смола разлагается, превращаясь, в основном, в такие газы, как углекислый газ, водород и метан, некоторая часть переходит в маслянистую фракцию, а также остается в виде кокса на самих волокнах. В зависимости от вида смол процессы их разложения протекают в температурном диапазоне от 450 °С до 1000 °С. Более низкие температуры используются при разложении полиэфирных смол, тогда как эпоксидные смолы или термопластичные матрицы требуют более высоких температур. Более высокие температуры поддерживаются в печах цементного производства, в которых композитные отходы преобразуются в энергию и в сырьевые компоненты цемента (наполнители и волокна).

Термическая обработка может происходить в различных условиях, поэтому может быть принципиально поделена на следующие направления:

- Сжигание — термическая обработка ПКМ в присутствии достаточного количества кислорода (подача кислорода в реактор — не менее стехиометрического) с полным превращением сложных органических соединений углерода полимерной матрицы в углекислый газ, в том числе с рекуперацией энергии и/или извлечением волокна.

- Пиролиз — термическая обработка ПКМ без доступа кислорода или с недостатком кислорода (подача кислорода в реактор — значительно меньше стехиометрического), в том числе с рекуперацией энергии и/или извлечением волокна.

- Плазмохимическая утилизация.

- Использование сверхкритических жидкостей.

В данном разделе представлен обзор различных существующих термических методов, применяемых для утилизации композитов и извлечения материалов, направляемых на вторичное использование.

Сжигание в специализированных установках для отходов (инсинераторах)

Сжигание является одним из вариантов уничтожения композиционных материалов. Армирующие волокна, в том числе углеродные, если речь идет о сжигании ПКМ на их основе, при этом безвозвратно теряются. После температурного обезвреживания неорганический остаток отправляется на захоронение. Однако если армирующим элементом композиционного материала является углеродное волокно, то необходимы дополнительные меры предосторожности из-за потенциального выброса коротких волокон в окружающую среду.

Сжигание в печах цементного производства

Сжигание отходов, в том числе отходов ПКМ в цементных печах дает преимущества для цементной промышленности. Производители цемента могут экономить на потреблении ископаемого топлива и сырья, что способствует снижению затрат и делает производство более экологически эффективным. Одним из преимуществ является то, что при реализации этого метода обращения с отходами используется существующий объект, что исключает необходимость инвестиций в строительство специализированного мусоросжигательный завода [8].

Технология сжигания отходов углепластиков в цементных печах предполагает использование измельченных отходов в качестве сырьевого компонента для цемента или источника энергии. Сырье обычно подают в печь через общую систему загрузки материала. [8].

Сжигание в псевдоожиженном слое с извлечением углеродного волокна

Одним из существующих термических методов утилизации ПКМ является процесс обработки в псевдоожиженном слое [2, 5]. Для этого отходы композиционных материалов измельчаются и подаются в высокотемпературную печь псевдоожиженного слоя, в которой воздух является кипящим газом. Матрица композиционных материалов подвергается быстрому термическому окислительному разложению, а углеродное волокно высвобождается и затем выдувается из печи псевдоожиженного слоя. Далее углеродное волокно отделяется от газового потока в циклоне и извлекается в приемный резервуар.

Общая схема процесса представлена на Рисунке 1.

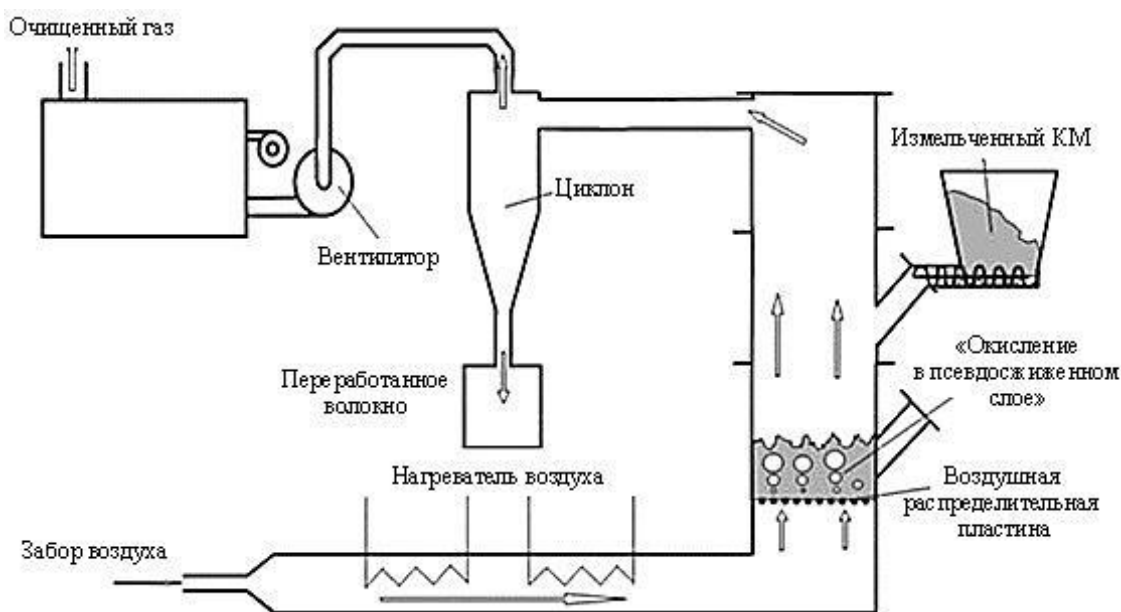


Рисунок 1. Принципиальная схема процесса сжигания ПКМ на основе углеродных волокон в высокотемпературном псевдоожиженном слое [2]

При определенных условиях возможно получение вторичного углеродного волокна с хорошими прочностными характеристиками, поэтому может быть использовано непосредственно при изготовлении новых полимерных композитов [5].

Органические вещества, образующиеся при разложении смол, дополнительно дожигаются во вторичной камере сгорания при температуре около 1000 °С для снижения выбросов загрязняющих веществ. Прочность углеродных волокна при этом снижается примерно на 25% (если процесс протекает при 550 °С) [5]. Анализ поверхности волокон показывает, что на них присутствуют минимальные загрязнения, а это значит, что волокна обладают хорошим потенциалом для связывания с полимерной матрицей при повторном применении [5].

Пиролиз

Наиболее изученным термическим процессом для утилизации ПКМ является пиролиз, осуществляемый в отсутствие кислорода или в присутствии небольшого количества кислорода. Кроме того, есть исследования по пиролизу ПКМ в присутствии пара [5]. Продуктами разложения ПКМ при этом являются масло, газы и твердые продукты (волокна, остатки наполнителя и уголь). На волокнах, как правило, образуется слой кокса требующий последующей обработки (очистки) волокна в печи при 450°С для его дожигания, как например, для углепластиков. Однако дополнительная обработка также приводит к дополнительной деградации волокон.

Процесс пиролиза наиболее часто используется для утилизации ПКМ, армированных углеродным волокном, и достиг коммерчески эксплуатируемого промышленного масштаба. Условная схема утилизации ПКМ в пиролизной печи представлена на Рисунке 2.

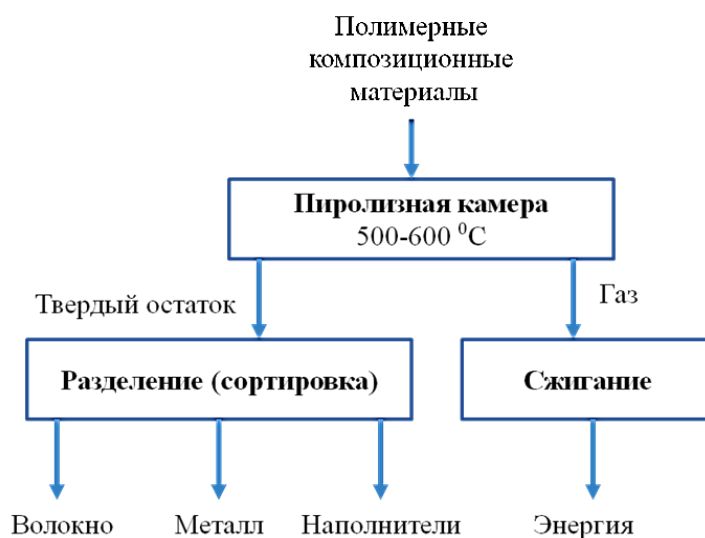


Рисунок 2. Общая схема процесса пиролиза [2]

Различают низкотемпературный пиролиз (300-500 °С), при котором получают волокна, масла и твердые вещества (продукты разложения полимерного связующего); среднетемпературный пиролиз (500-800 °С) с выделением волокон, масел, газов и меньших количеств твердые веществ; и высокотемпературный пиролиз (800-1500 °С), в результате которого получают главным образом волокна и пиролизные газы (выход твердых веществ и нефти незначителен) [2].

Обработка высокими температурами пагубно влияет на стекловолокно, а его механические свойства уменьшаются, по меньшей мере, на 50 % при минимальной температуре процесса равной 450°С [13]. Учитывая сравнительно низкую стоимость

первичного стекловолокна и такую значительную потерю прочностных свойств вторичного стекловолокна, пиролиз для ПКМ на основе стекловолокна обычно не целесообразен.

Углеродные волокна менее чувствительны к воздействию температуры в процессе пиролиза, но извлеченные волокна могут быть загрязнены коксом, остающимся после разрушения матрицы, что затрудняет в дальнейшем их хорошую связь с новой смолой. При температуре 1300 °С связующее композиционного материала удаляется полностью, а получаемые волокна остаются абсолютно чисты, но их механические свойства значительно снижаются [15].

Многие исследования показали, что условия обработки играют большую роль в свойствах полученных волокон, а сами волокна имеют различную чувствительность к условиям пиролиза в зависимости от их типа [12]. В окислительных условиях эпоксидные смолы легче разлагаются, чем в инертных, а при температурах в диапазоне 500-600°С возможно полностью удалить остатки смолы [5].

Преимуществами пиролиза являются высокий выход волокон, возможность использования тепла от разложения полимерного компонента, универсальность оборудования, хорошая адгезия эпоксидного связующего к полученным вторичным углеродным волокнам и широкие возможности коммерческого использования. К недостаткам процесса относятся неравномерный нагрев рабочей зоны реактора (в результате разложение связующего может быть неполным) и необходимость нейтрализации пиролизных газов, содержащих опасные соединения [5].

В области пиролиза существуют два исследовательских направления: каталитический пиролиз и пиролиз с добавками в виде различных веществ. С использованием всевозможных катализаторов значительно повышается выход некоторых основных пиролизных продуктов. С их помощью можно заметно уменьшить температуру процесса пиролиза. К недостаткам каталитического пиролиза относится высокая степень коксования на стенках катализаторов и усложнение процесса [5]. Многие проекты по утилизации углепластиков сосредоточены вокруг частичного процесса пиролиза, при котором смоляная матрица сжигается с ограниченным количеством кислорода. Углеродные волокна, обработанные таким образом, сохраняют 90 % или более своих первоначальных механических свойств [5, 12].

Микроволновый пиролиз

Первые исследования по применению метода микроволнового пиролиза для утилизации композитов были проведены в 2004 году [9]. В течение последних пятнадцати лет было выполнено множество исследований по использованию микроволнового пиролиза извлечения углеродных и стеклянных волокон [9]. Основным преимуществом микроволн является то, что материал нагревается не только с поверхности, но и в его сердцевине, поэтому передача тепла происходит очень быстро, что позволяет экономить энергию. Обычно, при микроволновом пиролизе композиционные материалы нагреваются в инертной атмосфере, при этом матрица разлагается с образованием газов и маслянистой фракции. Общая схема процесса представлена на Рисунке 3. При извлечении углеродных волокон методом микроволнового пиролиза их механические свойства заметно ухудшаются. Ввиду неудовлетворительных результатов данный метод не получил дальнейшего развития и на сегодня предпочтения отдают другим методам.

Плазмохимические технологии

Помимо перечисленных выше термических методов утилизации ПКМ не снижается интерес к плазмохимическим технологиям, которые заключаются в использовании низкотемпературной плазмы и позволяют проводить пиролиз в условиях высокой температуры. Преимущество плазмохимического метода в том, что он позволяет использовать не очень ценное сырье или трудно перерабатываемые фракции [15]. Недостатками данного метода в качестве метода утилизации углепластиков можно считать [15]:

- низкую интенсивность процесса — удельная производительность реакционного объема составляет не более 100 кг/ч на каждый кубический метр реактора, поэтому печи имеют большую металлоемкость и требуют для размещения значительных площадей;
- невозможность переработки отходов в ценные продукты — дорогостоящее углеродное волокно теряется в виде углекислого газа.

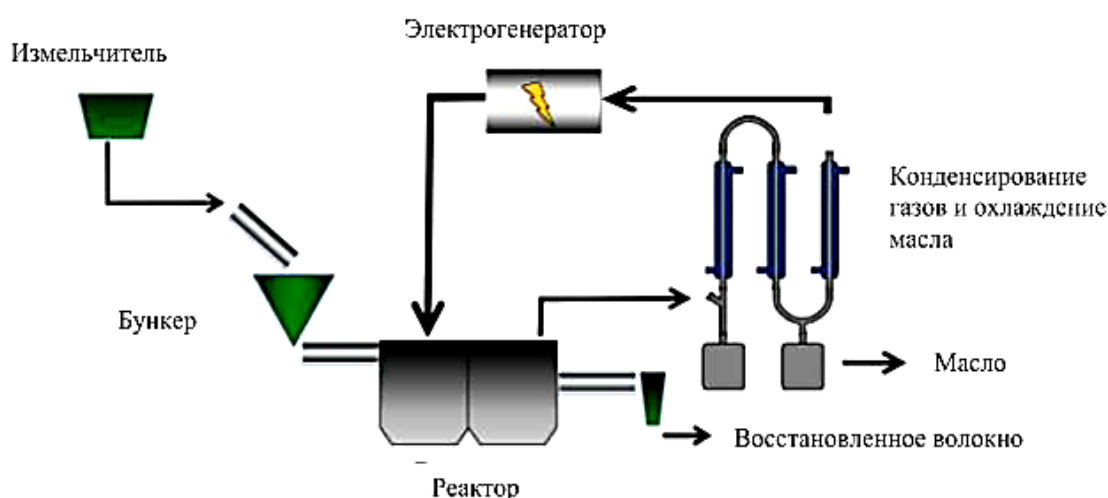


Рисунок 3. Общая схема процесса СВЧ пиролиза [10].

Стоит отметить тот факт, что сажа, полученная в плазме, намного превосходит по свойствам сажу, полученную другими способами [15]. К сожалению, до сих пор еще не существует плазмохимического метода получения сажи в промышленных объемах. Кинетические исследования процессов еще не завершены, да и технологическое оборудование до конца не проработано. Так что пока результаты всех этих исследований можно найти только в патентных научных источниках. Однако упомянутые методы проведения процесса пиролиза вполне можно считать перспективными.

Сольволиз в сверхкритических жидкостях

Некоторые химические методы утилизации также осуществляются при высоких температурах, но ввиду особенностей протекания процесса разложения не совсем корректно рассматривать их как термические - основная специфика процесса сольволиза направлена на реакцию обменного разложения между растворенным веществом и растворителем, а температура выступает в качестве вспомогательного агента, придающего среде определенные условия для благополучного протекания процесса. Особое место среди методов сольволиза занимает использование сверхкритических жидкостей, в том числе воды, для разложения полимерной матрицы ПКМ. Основным преимуществом такого метода является

использование сравнительно безопасных с экологической точки зрения растворителей (основ для сольволизного раствора) – как правило, это вода, которая в сверхкритических условиях обладает отличными растворяющими свойствами. Однако, для создания сверхкритических условий требуются достаточно высокие температуры и давления (для воды – более 374 °С и более 22,1 МПа), которые в совокупности с благоприятными для коррозии условиями обуславливают необходимость применения дорогостоящего высокотехнологичного оборудования, что сдерживает развитие промышленных технологий в этом направлении.

Основные направления развития и промышленного применения технологий

В настоящее время, таким образом, экспериментально доказана принципиальная возможность применения различных технологий термической обработки полимерных композиционных материалов для уничтожения (сжигания) или утилизации с извлечением вторичного углеродного волокна.

В целом, процессы термической обработки отходов композиционных материалов представляют большой интерес, так как в зависимости от применяемых условий позволяют решать разные задачи. Так, использование печей цементного производства позволяет с минимальными затратами уничтожать полимерные композиционные материалы различного состава, в том числе на основе разных волокон и из разных связующих. Именно такая технология рассматривается в качестве основной для выполнения требований Европейской директивы об отходах транспортных средств (англ. «Directive 2000/53/EC on End-of-life Vehicle»), в соответствии с которой с 2015 года в Европейском союзе не менее 95 % массы транспортного средства должны быть утилизированы, в том числе не менее 85 % - повторно использованы или переработаны с получением вторичных материалов. Сжигание ПКМ в цементных печах происходит с полезным использованием их энергии для процессов обжига цементного клинкера, поэтому такая технология считается удовлетворяющей требованиям по вторичному использованию. Однако при этом углеродное волокно как вторичный ресурс теряется.

Пиролиз, наряду с сольволизом, является одним из приоритетных направлений развития промышленных технологий, так как, с одной стороны, возможен при сравнительно легко достижимых условиях в оборудовании с достаточной производительностью, а с другой стороны позволяет извлекать вторичное углеродное волокна достаточно неплохого качества. Извлечение стекловолокна методом пиролиза нецелесообразно, ввиду значительной потери прочностных свойств. Извлечение органических волокон термическими методами невозможно ввиду близких температур термического разложения волокон и матрицы.

Для эффективного пиролиза полимерные композиционные материалы на основе углеродного волокна должны быть предварительно измельчены для более равномерного нагрева и разложения полимерной матрицы. При бескислородном термическом разложении ПКМ на основе углеродного волокна на самих волокнах могут оставаться частицы сажи, которые будут препятствовать взаимодействию этих волокон с новым связующим при повторном использовании. Для сравнения, в процессе сольволиза, если волокно полностью освобождено от матрицы, такое загрязнение отсутствует и, следовательно, адгезия волокна будет лучше [5]. Однако, как свидетельствуют опубликованные результаты различных работ, многое зависит от корректных условий процесса, поэтому исследования в этой области остаются актуальными.

Выводы

1. Приведен анализ современных методов термической утилизации полимерных композитных материалов, армированных углеволокном, рассмотрены основные направления, отличающиеся температурными условиями, средой проведения процесса и другими показателями.

2. На основании анализа результатов опубликованных исследований установлено, что метод пиролиза наиболее широко применяется на практике так позволяет извлекать вторичное углеродное волокно с небольшой потерей его прочностных свойств в сравнении с первичным волокном и при этом отличается сравнительно «мягкими» условиями процесса, которые могут быть обеспечены в оборудовании с приемлемой стоимостью.

3. Наиболее перспективные направления исследований в области термических методов утилизации полимерных композиционных материалов заключатся в подборе и обосновании параметров и технологических режимов работы технологии пиролиза ПКМ.

Результаты, представленные в статье, были 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. Куликова Ю. В., Слюсарь Н. Н., Шайдурова Г. И. Анализ проблемы утилизации отходов композиционных материалов // Бюллетень науки и практики. 2017. №11 (24). С. 255-261.
2. Петров А. В., Дориомедов М. С., Скрипачев С. Ю. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2015. №12. С. 12.
3. Куликова Ю. В., Тукачева К. О. Анализ технологий утилизации полимерных композиционных материалов // Вестник ПНИПУ. Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 4 (24). С. 103-122.
4. Куликова Ю. В., Слюсарь Н. Н., Коротаев В. Н. Разработка методов утилизации полимерных композиционных материалов // Твердые бытовые отходы. 2018. №1. С. 42-44.
5. Oliveux G., Dandy L. O., Leeke G. A. 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.
6. 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.
7. Yang Y., Boom R., Irion B., van Heerden D.J., Kuiper P., de Wit H. Recycling of composite materials // Chemical Engineering Process. 2012. Vol. 51. P. 53–68.
8. Holcim Group GTZ. Guidelines on co-processing waste materials in cement production. The GTZ-Holcim Public Private Partnership. Holcim Group Support Ltd and Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. 2006.
9. Åkesson D., Foltynowicz Z., Christéen 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. P. 1136-1142.
10. СВЧ-пиролиз полимеров в порошке графита. Режим доступа: <https://goo.gl/zaWi57> (дата обращения 22.10.2018).

11. 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.
12. Meyer L. O., Schulte K., Grove-Nielsen E. CFRP-recycling following a pyrolysis route: process optimization and potentials // *Journal of Composite Materials*. 2009. Vol. 43. No. 9. P. 1121-1132.
13. Feih S. et al. Mechanical properties of thermally-treated and recycled glass fibres // *Composites Part B: Engineering*. 2011. Vol. 42. No. 3. P. 350-358.
14. Jiang G. et al. Surface characterisation of carbon fibre recycled using fluidised bed // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254. No. 9. P. 2588-2593.
15. Разина Г. Н. Переработка углеродсодержащих веществ в низкотемпературной плазме. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. 2005. 88 с.

References:

1. Kulikova, Yu., Slyusar, N., & Shaidurova, G. (2017). Analysis of waste composite materials utilization problems. *Bulletin of Science and Practice*, (11), 255-261 (in Russian).
2. Petrov, A. V., Doriomedov, M. S., & Skripachev, S. Yu. (2015). Foreign experience of manufacturing products using recycled polymer composites (review). *All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials*, (12). 12. (in Russian).
3. Kulikova, Yu. V., & Tukacheva, K. O. (2017). Analysis of recycling technologies of polymer composite materials. *About this journal transport. Transport facilities. Ecology*, 4 (24). 103-122 (in Russian).
4. Kulikova, Yu. V., Slyusar', N. N., & Korotaev, V. N. (2018). Razrabotka metodov utilizatsii polimernykh kompozitsionnykh materialov. *Tverdye bytovye otkhody*, (1). 42-44. (in Russian).
5. Oliveux, G., Dandy, L. O., & Leeke, G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72, 61-99.
6. Pimenta, S., & Pinho, S. T. (2011). Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: technology review and market outlook. *Waste management*, 31(2), 378-392.
7. Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D.J., Kuiper, P., & de Wit, H. (2012). Recycling of composite materials. *Chemical Engineering Process*, (51). 53-68.
8. Holcim Group GTZ (2006) Guidelines on co-processing waste materials in cement production. The GTZ-Holcim Public Private Partnership. Holcim Group Support Ltd and Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH
9. Åkesson, D., Foltynowicz, Z., Christéen, J., & Skrifvars, M. (2012). Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(17), 1136-1142.
10. SVCh-piroliz polimerov v poroshke grafita. Rezhim dostupa: <https://goo.gl/zaWi57> (data obrashcheniya 22.10.2018).
11. Asmatulu, E., Twomey, J., & Overcash, M. (2014). Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept. *Journal of Composite Materials*, 48(5), 593-608.
12. Meyer, L. O., Schulte, K., & Grove-Nielsen, E. (2009). CFRP-recycling following a pyrolysis route: process optimization and potentials. *Journal of Composite Materials*, 43(9), 1121-1132.

13. Feih, S., Boiocchi, E., Mathys, G., Mathys, Z., Gibson, A. G., & Mouritz, A. P. (2011). Mechanical properties of thermally-treated and recycled glass fibres. *Composites Part B: Engineering*, 42(3), 350-358.

14. Jiang, G., Pickering, S. J., Walker, G. S., Wong, K. H., & Rudd, C. D. (2008). Surface characterisation of carbon fibre recycled using fluidised bed. *Applied Surface Science*, 254(9), 2588-2593.

15. Razina, G. N. (2005). Pererabotka uglerodsoderzhashchikh veshchestv v nizkotemperaturnoi plazme. Moskw: RKhTU im. D. I. Mendeleeva. 88. (in Russian).

*Работа поступила
в редакцию 25.11.2018 г.*

*Принята к публикации
28.11.2018 г.*

Ссылка для цитирования:

Тукачева К. О., Ильиных Г. В., Слюсарь Н. Н. Термические методы утилизации и уничтожения полимерных композиционных материалов на основе углеродных волокон // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. №12. С. 51-61. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/12-71> (дата обращения 15.12.2018).

Cite as (APA):

Tukacheva, K., Ilinykh, G., & Sliusar, N. (2018). Thermal treatment and disposal of carbon fiber reinforced composites. *Bulletin of Science and Practice*, 4(12), 51-61. (in Russian).