

УДК 678
AGRIS T01

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/49/09>

**АНАЛИЗ ФАКТОРОВ,
ВЛИЯЮЩИХ НА СВОЙСТВА ВТОРИЧНОГО УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА
И МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ЕГО ПРИМЕНЕНИЕМ**

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

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

**ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE PROPERTIES
OF RECYCLED CARBON FIBER AND MATERIALS ON ITS BASIS**

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

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

Аннотация. Для утилизации увеличивающихся объемов отходов композиционных материалов, в частности углепластиков, необходимо развитие технологий извлечения и использования вторичного углеродного волокна. При этом возникает научная и прикладная задача подобрать такие условия извлечения волокна, которые позволят максимально сохранить желаемые значения его физико-химических характеристик, сравнимые с первичным волокном. В данной работе представлен анализ факторов, влияющих на свойства вторичного углеродного волокна и материалов, полученных с его применением, на всем протяжении его жизненного цикла.

Abstract. For recycling of increasing volumes of waste of composites, in particular carbon plastics, it is necessary to develop technologies for the extraction and application of recycled carbon fiber. At the same time there is a scientific and practical task to choose a such conditions of fiber extraction which will allow to keep desirable values of its physical and chemical characteristics as high as possible and comparable with primary fiber. This paper presents an analysis of the factors affecting the properties of secondary carbon fiber and materials obtained with its use throughout its life cycle.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, вторичное углеродное волокно, углепластик, утилизация, влияющие факторы, жизненный цикл.

Keywords: polymer composite material, recycled carbon fiber, recycling, factors, life cycle.

Введение

Углеродное волокно и полимерные композитные материалы на его основе заслуженно считаются материалами будущего, открывающими возможности создания технологичного эффективного оборудования для многих нужд. Уникальное сочетание низкого веса и высокой прочности — востребованная характеристика для авиационных судов и автомобилей,

ветроэнергетики, спортивного и туристического оборудования. Проблема утилизации таких изделий может быть решена с развитием промышленно реализуемых технологий по извлечению и повторному применению углеродного волокна [1–2].

Перспективное направление утилизации растущих объемов отходов полимерных композиционных материалов, в частности углепластиков, с получением вторичного углеродного волокна связано, в первую очередь с разработкой технологий освобождения волокна от полимерной матрицы с максимальным сохранением свойств волокна. Именно хорошие физико–механические свойства вторичного углеродного волокна будут определять его востребованность на рынке конструкционных материалов.

Качество вторичного углеродного волокна и его потребительские свойства определяются, прежде всего, тремя группами параметров:

- физико–механическими свойствами отдельного волокна;
- размерами дискретных волокон и их ориентацией;
- состоянием поверхности волокон.

Важнейшие физико-механические свойства углеродных волокон — это диаметр, модуль упругости при растяжении, разрушающее напряжение при растяжении, относительное удлинение при растяжении. От этих свойств напрямую зависят прочностные свойства производимых композиционных материалов.

Размеры дискретных волокон и их ориентация определяют в первую очередь удобство работы с вторичным углеродным волокном, а также объемную плотность волокна в композите и его анизотропные свойства, что косвенно также сказывается на механических свойствах композита.

Состояние поверхности волокна, в том числе наличие на поверхности остатков смолы, пироуглерода, а также различных функциональных групп, определяет дальнейшую адгезию между волокном и смолой. В результате плохой адгезии возможно «выскальзывание» волокна из матрицы и разрушение композита при относительно небольших нагрузках.

Качество вторичного углеродного волокна обусловлено как свойствами первичных материалов, использованных для производства полимерных композиционных материалов, так и последующим их жизненным циклом. Условно все факторы, влияющие на качество вторичного углеродного волокна можно поделить на следующие группы:

- состав и свойства отходов полимерных композиционных материалов;
- технологии и условия извлечения вторичного углеродного волокна;
- технологии подготовки и укладки вторичного углеродного волокна;
- технологии изготовления полимерных композиционных материалов на основе вторичного углеродного волокна.

Внутри каждой группы факторов в свою очередь можно выделить отдельные влияющие факторы.

Влияние состава и свойств отходов полимерных композиционных материалов на условия извлечения и свойства вторичного углеродного волокна

В Таблице представлен анализ влияния состава и свойства отходов полимерных композиционных материалов на качество вторичного углеродного волокна.

Как следует из Таблицы условия разложения полимерных композиционных материалов из разных марок первичных углеродных волокон и разных смол значительно отличаются, однако на практике поток утилизируемых отходов будет смешанным, поэтому подбираются усредненные условия разложения полимерной матрицы и высвобождения углеродного волокна.

Таблица.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВА ОТХОДОВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА КАЧЕСТВО ВТОРИЧНОГО УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

<i>Фактор</i>	<i>Результаты исследований и выводы</i>
Свойства первичного углеродного волокна	Вероятно, что разные волокна имеют различную чувствительность к условиям пиролиза в зависимости от их типа. Например, углеродные волокна Hexcel AS4 показали сильное окисление при температуре 550 °С в кислороде, тогда как углеродные волокна высокой прочности Toho-Tenax не окислялись при температуре 600 °С на воздухе. Проблема в том, что на практике при утилизации отходов ПКМ обычно имеют дело со смесью разных материалов и волокон, поэтому подобрать идеальные условия может быть сложно. Поэтому, чтобы стабилизировать качество получаемого вторичного волокна специально смешивают разные партии отходов [3]
Свойства матрицы	Термическое освобождение углеродных волокон проводят при температуре от 450 до 700 °С в зависимости от вида применяемой смолы. Для разрушения полиэфирных смол используются более низкие температуры, а для разрушения эпоксидных смол или термопластов, таких как, например, полиэфирэфиркетоны, требуются более высокие температуры [3]
Наличие и вид плетения	С использованием пиролиза может быть затруднительно удалить смолу, в частности, между двумя пересекающимися жгутами волокон при плотном плетении [3]
Эксплуатация ПКМ	При утилизации отходов препрегов возможно извлечение длинного волокна или даже ткани с сохранившимся плетением, которую теоретически можно повторно использовать для формования [4]. Исследования подтверждают потерю прочностных свойств ПКМ в условиях, имитирующих старение [5], но отсутствуют данные сравнительной характеристики волокна, извлеченного одинаковым способом из только что изготовленного ПКМ и ПКМ после эксплуатации

Влияние технологии и условий извлечения на свойства вторичного углеродного волокна

Следующей значимой группой факторов, влияющей на свойства вторичного углеродного волокна, являются технологии подготовки полимерных композиционных материалов, технологии извлечения и очистки углеродного волокна.

При термическом извлечении волокна из ПКМ наблюдается меньшее снижение прочности на растяжение, чем при нагревании на воздухе чистых углеродных волокон (без матрицы) [3]. Пиролиз ведет к образованию пироуглерода на поверхности волокон, что ухудшает дальнейшую адгезию с новой матрицей [6]. Пиролиз углеродного волокна при температуре выше 1300°С позволяет полностью удалить пироуглерод с поверхности, получить идеально чистые волокна с высокоактивированной поверхностью, но их прочность значительно снижена по сравнению с прочностью первичного волокна. Таким образом, необходим компромисс между чистотой волокна и его прочностью, и, соответственно, обоснованный выбор температуры. Температура пиролиза в диапазоне от 500 до 550 °С, по-видимому, является оптимальной, чтобы сохранять приемлемую прочность углеродных волокон (для сравнения, стекловолокно сохраняет менее 50% своих механических свойств при температуре 400 °С) [3].

Углеродные волокна, извлеченные при помощи обработки в псевдооживленном слое, обычно более повреждены, чем при пиролизе, однако это во многом зависит от условий

процесса. В дополнение к высокой температуре повредить волокна может также истирание песком [3]. Воздействие горячей окислительной атмосферы на углеродное волокно превращает некоторые поверхностные гидроксильные группы в СО и СООН при сохранении соотношения О/С. Извлечение углеродного волокна посредством термического окислительного разложения полимерной матрицы не ослабляет межфазных связей [7].

По некоторым данным влияние низкотемпературного сольволиза на свойства волокна сравнимо с влиянием высокотемпературного сольволиза и пиролиза из-за использования сильных кислот и/или окислителей. Наличие молекул растворителя и катализатора на поверхности волокна может приводить к плохой адгезии смолы к волокну и, следовательно, к плохим механическим свойствам нового ПКМ [3].

Влияние технологии подготовки вторичного углеродного волокна

Для удаления пироуглерода, оставшегося на поверхности волокна после пиролиза, используется термическая обработка в газовой фазе, содержащей кислород (что, однако, может приводить к потере прочности на растяжение). В качестве альтернативы иногда рассматривается возможность использования диоксида углерода и паров воды вместо кислорода для обработки волокон [6].

Волокно, обработанное при высокой температуре (600 °С) значительно повреждено и непригодно для производства ПКМ, в то время как термическая обработка при более низких температурах (450 °С) приводит к незначительным повреждениям волокна без очевидных химических изменений поверхности волокна, поэтому связана с незначительным увеличением адгезии к новой эпоксидной матрице [8]. Волокна, извлеченные при 550 °С в азоте в течение 2 ч и термически обработанные во второй стадии при 550 °С в окислительных условиях, сохранили более 95% их прочности на растяжение без остатка смолы на поверхности [3].

Еще одно направление обработки извлеченного волокна — воздействие плазмы. В исследовании [9] термически обработанные первичные углеродные волокна, а также вторичные углеродные волокна, полученные в процессе термической обработки, подвергались обработке плазмой. Влияние двух различных технологических газов (азота и монооксида азота) и расстояния между источником плазмы и поверхностью волокна изучалось с целью увеличения концентрации кислорода и азота на поверхности волокна. Более высокое содержание кислород- и азотсодержащих функциональных групп на поверхности волокна ведет к лучшей адгезии между углеродным волокном и матрицей (эпоксидной смолой).

Обработка вторичного углеродного волокна кислородом позволяет получить обогащенную кислородом поверхность, которая лучше взаимодействует с эпоксидной смолой, способствуя тем самым адгезии без необходимости дополнительной обработки волокна клеящими веществами [10].

Химическая обработка азотной кислотой вызывает незначительные повреждения волокна, но приводит к существенной модификации его поверхности, что в свою очередь в дальнейшем увеличивает адгезию волокно-матрица [8].

Влияние технологии укладки вторичного углеродного волокна

Вторичное углеродное волокно используется для объемного армирования новых полимерных композиционных материалов, получения и применения нетканых материалов (матов из хаотично расположенных волокон), ориентированных лент.

Для объемного армирования обычно используется волокно размерами до 1 мм, волокно размерами до 10 мм — для мокрого способа производства нетканых матов, а более длинное волокно — для производства нетканых матов сухим способом [11].

Сухой способ производства матов из хаотично ориентированных волокон в сравнении с мокрым способом, в котором дополнительно использовалась карбоксиметилцеллюлоза, позволяет добиться более высокой объемной плотности волокна в ПКМ при использовании одинакового давления, что может быть объяснено использованием карбоксиметилцеллюлозы при диспергировании волокна в воде. Карбоксиметилцеллюлоза увеличивает жесткость мата за счет сцепления волокон друг с другом, что препятствует дальнейшему уплотнению [11].

Способ сухого выравнивания дискретных углеродных волокон был разработан путем модификации процесса производства пряжи [12]. В качестве суспендирующей и несущей среды для прерывистых углеродных волокон использовались пушистые синтетические волокна вместо обычно используемой жидкой среды. Используя механическое взаимодействие в методе сухого выравнивания, путем вытягивания смесь из прерывистых углеродных волокон длиной 200 мм и пушистых полипропиленовых волокон была изготовлена лента. Затем ленту скручивали в пряжу и получали выровненную заготовку пряжи, в которой приблизительно 70% углеродных волокон были выровненных под углом $\pm 14^\circ$ относительно направления вытягивания. Модуль упругости при растяжении композитного образца вдоль выровненного направления был примерно в 10 раз больше, чем в поперечном направлении, и примерно в 3,5 раза больше, чем у образцов, полученных из той же пряжи со случайной ориентацией.

При мокром способе производства матов волокна предварительно диспергируют в вязкой жидкости, для чего используются растворы карбоксиметилцеллюлоза, глицерин и другие вещества. По результатам [11] маты, полученные с использованием «мокрого» способа и раствора карбоксиметилцеллюлозы обладают более низкими прочностными свойствами, что обусловлено неоднородной пропиткой новой смолой, поскольку карбоксиметилцеллюлоза действует как барьер, который препятствует течению матрицы при пропитке.

Высокая вязкость глицерина также позволяет диспергировать пучки волокна до отдельных волокон [13]. Для исследований примерно 500 мг волокон были диспергированы в 200–400 мл раствора глицерин/вода. Осевая крыльчатка перемешивателя работала со скоростью 1100 об/мин 5 минут, после чего все оставшиеся пучки волокон были удалены из раствора, и диспергированная суспензия волокон была равномерно вылита на нейлоновую сетку, закрывающую сито из нержавеющей стали толщиной 10 см. Вакуум применяли для удаления глицерина и уплотнения волоконного мата. Пятиминутное время перемешивания было разработано для предотвращения чрезмерного повреждения волокон. Всего на мат было нанесено около 10 г волокон. Затем мат тщательно промывали теплой деионизированной водой для удаления глицерина и сушили при 180 °С в течение двух часов. Однако до конца исключить влияние глицерина на последующую адгезию волокна и матрицы не удалось. Высушивание матов, полученных при диспергировании волокна в глицерине, при температуре 300 °С применялось для обеспечения испарения оставшегося глицерина, который испаряется при ~ 290 °С.

При «мокроем» способе укладки волокна наблюдается негативное влияние диспергирующего агента, поэтому необходимы дальнейшие исследования этого влияния, а также поиск подходящих альтернатив применяемым для этих целей веществам. Кроме того, необходимо исследовать возможности дополнительной обработки волокна с целью

изменения поверхности волокна и возможность применения подходящих адгезивных агентов [11].

Механические свойства полученного ПКМ зависят, в том числе, от объемной плотности волокна – чем выше плотность, тем выше прочность. Объемная плотность ПКМ на основе первичного волокна обычно составляет 50–63%, у материалов на основе вторичного волокна этот показатель значительно ниже. При производстве матов с хаотичным расположением волокон объемная плотность может составлять до 40% (обычно 30%) при использовании давления более 100 бар (10^{-7} Па), однако при этом возможны повреждения волокна, из-за которых сокращается его длина и теряются прочностные свойства [4]. В исследовании [14] за счет ориентирования волокна удалось добиться 41–55% объемной плотности волокна, однако это ниже, чем ожидалось, так как отдельные неправильно ориентированные волокна приводили к образованию областей с низкой плотностью волокна, заполненных матрицей. По данным S. J. Pickering, Z. Liu, T. A. Turner, K. H. Wong выравнивание (ориентирование) волокна позволяет достичь 60% объемной плотности волокна при давлении до 100 бар с минимальными потерями прочности волокна [4]. За счет давления происходит увеличение объемной плотности волокна, от которого в свою очередь зависят прочностные свойства ПКМ. При использовании слишком высокого давления возможны повреждения волокна, из-за которых сокращается его длина, и теряются прочностные свойства.

При формовании изделий из ПКМ с добавлением углеродного волокна для объемного армирования при прохождении через дюзы происходит частичная ориентация волокна (появляются анизотропные свойства), однако при этом практически невозможно добиться высокой объемной плотности волокна. Поэтому целесообразнее выполнять предварительную ориентацию волокна в жидкости, а затем удалять жидкость и высушивать волокно (в виде лент) для последующего применения. Однако, для ориентации углеродного волокна невозможно применение методов, широко используемых для других волокон (например, чесание хлопковых волокон), ввиду большой хрупкости волокна [4].

ПКМ с использованием хорошо ориентированного волокна имеет на 90% большую жесткость и на 100% большую прочность на растяжение в направлении ориентации волокна, чем ПКМ из хаотично ориентированного волокна [15].

Для создания ориентированных лент использовалась суспензия волокна в растворе глицерина, которая при помощи специального сопла подавалась внутрь вращающегося сетчатого барабана. Скорость на выходе сопла была тангенциально выровнена по окружности барабана. Волокна становятся частично выровненными в сходящемся сопле и дополнительно выровнены, когда они контактируют с сеткой на барабане [11].

Влияние технологий изготовления полимерных композиционных материалов на основе вторичного углеродного волокна

Качество вторичного углеродного волокна, как уже было сказано выше, определяется, в том числе, и его адгезией к новой матрице. При этом в качестве перспективных направлений исследований можно рассматривать применение в качестве матрицы не только «классических» фенолформальдегидных и эпоксидных смол, но и других полимерных материалов с хорошей адгезией к вторичному волокну.

Гибридные нетканые материалы из вторичного углеродного волокна и термопластичных волокон могут быть непосредственно использованы для производства ПКМ и не требуют дополнительного добавления матрицы, и соответственно, не требуют стадий пропитки. В ходе исследований термопластичные композиты, изготовленные из рубленого углеродного волокна/полипропилена в пропорциях 1%, 5% и 7% по массе волокна,

были получены путем экструзии и инъекции. Термопластичное волокно (полипропилен) действует при этом как матричный компонент. По результатам механических, термических и морфологических испытаний полученный композит представляет собой сложную фазовую систему с низкой адгезией между углеродными волокнами и полипропиленовой матрицей, что позволяет сделать вывод о необходимости выбора других материалов матрицы. Улучшение адгезии между волокном и полипропиленовой матрицей было достигнуто путем добавления связующего агента с малеиновым ангидридом [16].

Возможно получение гибридных композитов на основе ориентированного углеродного волокна и стекловолокна для придания ПКМ новых свойств (например, псевдопластических деформаций), однако более необходимо более детальные исследования. Гибридные композиты из углеродного и натурального волокна (например, льна) с эпоксидной матрицей могут быть применяться в случаях, когда снижение основных механических свойств, например жесткости и прочности, является приемлемым компромиссом для улучшения вторичных свойств, например шумоизоляционных, и снижения денежных затрат [17].

Выводы

Как следует из результатов выполненного анализа, качеством вторичного углеродного волокна можно управлять, подбирая те или иные методы его освобождения из полимерной матрицы, а также условия этого процесса (температуру, наличие окислителей и т. п.). Кроме того, качество полимерных композиционных материалов, полученных на основе вторичного углеродного волокна, также можно изменять, например, за счет дополнительной обработки и модификации поверхности волокна, его ориентирования и подбор матрицы.

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. Тукачева К. О., Куликова Ю. В., Ильиных Г. В. Апробация различных реагентов для химического извлечения углеродного волокна из полимерных композиционных материалов // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. №12. С. 42-50.
2. 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.
3. 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. V. 72. P. 61-99. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>
4. Pickering S. J., Liu Z., Turner T. A., Wong K. H. Applications for carbon fibre recovered from composites // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2016. V. 139. №1. P. 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/139/1/012005>
5. Barbosa A. P. C., Fulco A. P. P., Guerra E. S., Arakaki F. K., Tosatto M., Costa M. C. B., Melo J. D. D. Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites // Composites Part B: Engineering. 2017. V. 110. P. 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.004>
6. Limburg M., Stockschläder J., Quicker P. Thermal treatment of carbon fibre reinforced polymers (Part 1: Recycling) // Waste Management & Research. 2019. V. 37. №1_suppl. P. 73-82. <https://doi.org/10.1177/0734242X18820251>

7. Jiang G., Pickering S. J., Walker G. S., Wong K. H., Rudd C. D. Surface characterisation of carbon fibre recycled using fluidised bed // *Applied Surface Science*. 2008. V. 254. №9. P. 2588-2593. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.09.105>
8. Greco A., Maffezzoli A., Buccoliero G., Caretto F., Cornacchia G. Thermal and chemical treatments of recycled carbon fibres for improved adhesion to polymeric matrix // *Journal of Composite Materials*. 2013. V. 47. №3. P. 369-377. <https://doi.org/10.1177/0021998312440133>
9. Schneller A., Mueller W. M., Roessle R., Horn S. R. Surface Modification of Recycled Carbon Fibers by Use of Plasma Treatment // *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 2017. V. 742. P. 576-582. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.742.576>
10. Mazzocchetti L., Benelli T., D'Angelo E., Leonardi C., Zattini G., Giorgini L. Validation of carbon fibers recycling by pyro-gasification: The influence of oxidation conditions to obtain clean fibers and promote fiber/matrix adhesion in epoxy composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. V. 112. P. 504-514. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.07.007>
11. Wölling J., Schmiege M., Manis F., Drechsler K. Nonwovens from recycled carbon fibres—comparison of processing technologies // *Procedia CIRP*. 2017. V. 66. P. 271-276. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.281>
12. Miyake T., Imaeda S. A dry aligning method of discontinuous carbon fibers and improvement of mechanical properties of discontinuous fiber composites // *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*. 2016. V. 2. №3-4. P. 117-123. <https://doi.org/10.1080/20550340.2016.1265693>
13. Van de Werken N., Reese M. S., Taha M. R., Tehrani M. Investigating the effects of fiber surface treatment and alignment on mechanical properties of recycled carbon fiber composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. V. 119. P. 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.01.012>
14. Yu H., Potter K. D., Wisnom M. R. A novel manufacturing method for aligned discontinuous fibre composites (High Performance-Discontinuous Fibre method) // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. V. 65. P. 175-185. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.06.005>
15. Guell D. C., Graham A. L. Improved mechanical properties in hydrodynamically aligned, short-fiber composite materials // *Journal of composite materials*. 1996. V. 30. №1. P. 2-12. <https://doi.org/10.1177/002199839603000101>
16. Burn D. T., Harper L. T., Johnson M., Warrior N. A., Nagel U., Yang L., Thomason J. The usability of recycled carbon fibres in short fibre thermoplastics: interfacial properties // *Journal of Materials Science*. 2016. V. 51. №16. P. 7699-7715. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0053-y>
17. Longana M., Ondra V., Yu H., Potter K., Hamerton I. Reclaimed Carbon and Flax Fibre Composites: Manufacturing and Mechanical Properties // *Recycling*. 2018. Vol. 3. №4. P. 52. <https://doi.org/10.3390/recycling3040052>

References:

1. Tukacheva, K., Kulikova, Yu., & Ilinykh, G. (2018). Approbation of various reagents for chemical recovery of carbon fiber from polymer composite materials. *Bulletin of Science and Practice*, 4(12), 42-50. (in Russian).
2. Tukacheva, K., Ilinykh, G., & Slyusar, N. (2018). Thermal treatment and disposal of carbon fiber reinforced composites. *Bulletin of Science and Practice*, 4(12), 51-61. (in Russian).

3. 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. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>
4. Pickering, S. J., Liu, Z., Turner, T. A., & Wong, K. H. (2016). Applications for carbon fibre recovered from composites. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/139/1/012005>
5. Barbosa, A. P. C., Fulco, A. P. P., Guerra, E. S., Arakaki, F. K., Tosatto, M., Costa, M. C. B., & Melo, J. D. D. (2017). Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 110, 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.004>
6. Limburg, M., Stockschläder, J., & Quicker, P. (2019). Thermal treatment of carbon fibre reinforced polymers (Part 1: Recycling). *Waste Management & Research*, 37(1_suppl), 73-82. <https://doi.org/10.1177/0734242X18820251>
7. 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. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.09.105>
8. Greco, A., Maffezzoli, A., Buccoliero, G., Caretto, F., & Cornacchia, G. (2013). Thermal and chemical treatments of recycled carbon fibres for improved adhesion to polymeric matrix. *Journal of Composite Materials*, 47(3), 369-377. <https://doi.org/10.1177/0021998312440133>
9. Schneller, A., Mueller, W. M., Roessle, R., & Horn, S. R. (2017). Surface Modification of Recycled Carbon Fibers by Use of Plasma Treatment. In: *Key Engineering Materials (Vol. 742, pp. 576-582)*. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.742.576>
10. Mazzocchetti, L., Benelli, T., D'Angelo, E., Leonardi, C., Zattini, G., & Giorgini, L. (2018). Validation of carbon fibers recycling by pyro-gasification: The influence of oxidation conditions to obtain clean fibers and promote fiber/matrix adhesion in epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 112, 504-514. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.07.007>
11. Wölling, J., Schmieg, M., Manis, F., & Drechsler, K. (2017). Nonwovens from recycled carbon fibres—comparison of processing technologies. *Procedia CIRP*, 66, 271-276. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.281>
12. Miyake, T., & Imaeda, S. (2016). A dry aligning method of discontinuous carbon fibers and improvement of mechanical properties of discontinuous fiber composites. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2(3-4), 117-123. <https://doi.org/10.1080/20550340.2016.1265693>
13. Van de Werken, N., Reese, M. S., Taha, M. R., & Tehrani, M. (2019). Investigating the effects of fiber surface treatment and alignment on mechanical properties of recycled carbon fiber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 119, 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.01.012>
14. Yu, H., Potter, K. D., & Wisnom, M. R. (2014). A novel manufacturing method for aligned discontinuous fibre composites (High Performance-Discontinuous Fibre method). *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 65, 175-185. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.06.005>
15. Guell, D. C., & Graham, A. L. (1996). Improved mechanical properties in hydrodynamically aligned, short-fiber composite materials. *Journal of composite materials*, 30(1), 2-12. <https://doi.org/10.1177/002199839603000101>

16. Burn, D. T., Harper, L. T., Johnson, M., Warrior, N. A., Nagel, U., Yang, L., & Thomason, J. (2016). The usability of recycled carbon fibres in short fibre thermoplastics: interfacial properties. *Journal of Materials Science*, 51(16), 7699-7715. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0053-y>

17. Longana, M., Ondra, V., Yu, H., Potter, K., & Hamerton, I. (2018). Reclaimed Carbon and Flax Fibre Composites: Manufacturing and Mechanical Properties. *Recycling*, 3(4), 52. <https://doi.org/10.3390/recycling3040052>

*Работа поступила
в редакцию 11.11.2019 г.*

*Принята к публикации
17.11.2019 г.*

Ссылка для цитирования:

Ильиных Г. В., Слюсарь Н. Н. Анализ факторов, влияющих на свойства вторичного углеродного волокна и материалов, полученных с его применением // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №12. С. 79-88. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/49/09>

Cite as (APA):

Ilinykh, G., & Sliusar, N. (2019). Analysis of Factors Affecting the Properties of Recycled Carbon Fiber and Materials on its Basis. *Bulletin of Science and Practice*, 5(12), 79-88. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/49/09> (in Russian).