



6. Flisyuk O.M.; Toptalov V.S.; Martsulevich N.A.; Muratov O.V. Direct-flow cyclone. Pat. 195672U1 RU 2020

МЕХАНИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ СТЕКЛОПЛАСТИКА MECHANICAL PROCESSING OF REINFORCED GLASS PLASTIC WASTE

Федарович Е.Г.¹, Левданский А.Э.²

¹Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь, e-mail: zhenya.fedorovich.1999@mail.ru.
orcid. 0000-0002-2137-1260, тел: + 375295618241

²Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь, e-mail: alex_levdansky@mail.ru.
orcid. 0000-0003-2684-7771, тел: +375336007709

Аннотация. В статье рассмотрена возможность механической переработки отходов стеклопластика с целью получения вторичных материалов. Обоснована актуальность и целесообразность проведения исследований в области переработки отходов стеклопластика, с целью уменьшения их негативного воздействия на окружающую среду. Установлено, что наиболее перспективным и экологически безопасным методом переработки отходов стеклопластиков является механический метод. Разработана и сконструирована лабораторная экспериментальная установка исследования процесса механической переработки отходов стеклопластика. Описана методика проведения исследований. Проведены экспериментальные исследования по определению влияния технологических параметров процесса измельчения отходов стеклопластика в ударно-центробежной мельнице на гранулометрический состав продуктов измельчения. Построена графическая зависимость влияния частоты вращения ротора ударно-центробежной мельницы на гранулометрический состав продуктов измельчения и на количество недоизмельченного материала. На основании геометрических размеров недоизмельченного материала сделан вывод о механизме разрушения отходов стеклопластика в ударно-центробежной мельнице. Дана краткая характеристика фракций, образующихся при расходе продуктов измельчения отходов стеклопластика на ситах. Определены недостатки механической классификации волокнистого материала. Сделан вывод о возможности использования механического способа переработки отходов стеклопластика в ударно-центробежной мельнице для получения вторичных материалов.

Ключевые слова: стеклопластик, полимерная матрица, волокно, механическая переработка, ударно-центробежная мельница, механическая классификация.

Abstract. The article considers the possibility of mechanical processing of fiberglass waste in order to obtain secondary materials. The relevance and feasibility of conducting research in the field of fiberglass waste processing in order to reduce their negative impact on the environment are substantiated. It is established that the most promising and environmentally friendly method of fiberglass waste processing is the mechanical method. A laboratory experimental setup for studying the process of mechanical processing of fiberglass waste has been developed and designed. The research methodology is described. Experimental studies have been conducted to determine the effect of technological parameters of the fiberglass waste grinding process in an impact-centrifugal mill on the granulometric composition of the grinding products. A graphical dependence of the effect of the rotor speed of the impact-centrifugal mill on the granulometric composition of the grinding products and on the amount of undercrushed material has been constructed. Based on the geometric dimensions of the undercrushed material, a conclusion has been made about the mechanism of destruction of fiberglass waste in an impact-centrifugal mill. A brief description of the fractions formed during the screening of the products of grinding fiberglass waste on sieves is given. The shortcomings of the mechanical classification of fibrous material are determined. A conclusion is made about the possibility of using a mechanical method of processing fiberglass waste in an impact-centrifugal mill to obtain secondary materials.

Keywords: fiberglass, polymer matrix, fiber, mechanical processing, impact-centrifugal mill, mechanical classification.

Введение. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) представляют собой гетерогенную структуру состоящую в основном из армирующих элементов и полимерной матрицы. ПКМ обладают уникальными свойствами, сочетают высокую прочность с относительно небольшой плотностью, низкую теплопроводность, теплостойкость, стойкость к химическому и биологическому воздействию, благодаря чему используются во многих отраслях промышленности [1,2].

В настоящее время наблюдается непрерывный рост мирового рынка ПКМ. Его объем, по разным оценкам в 2019 году составил 12,0 млн. т в натуральном выражении. При этом, около 90 % волокнистых композитов, выпускаемых в мире, приходится на стеклопластики [2,3].

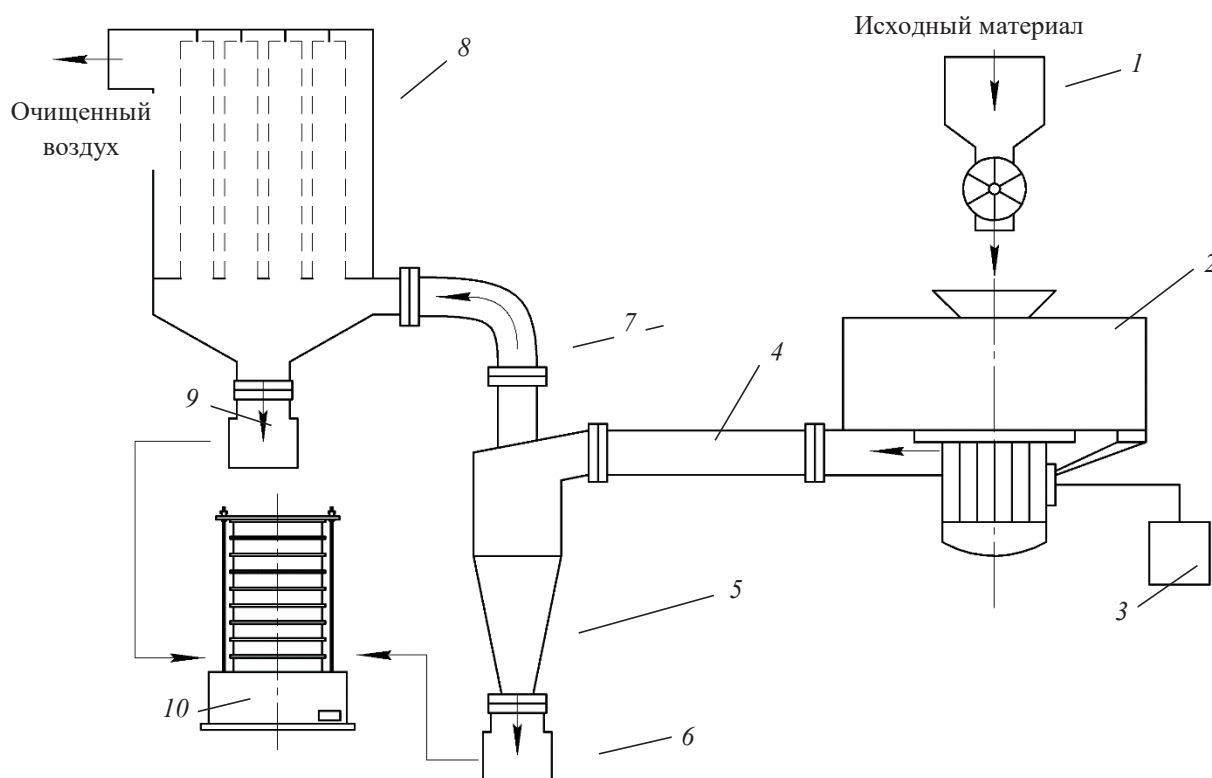
Серьезной проблемой объемного производства и применения ПКМ, в частности стеклопластиков, является их утилизация. С учетом специфических свойств ПКМ таких как стойкость к внешним воздействиям окружающей среды, проблема их утилизации носит, прежде всего, экологический характер [4]. Кроме того, государственное законодательство многих стран формирует поведение общества стимулируя темпы переработки отходов и сводя к минимуму использование свалок.

Основной путь решения проблемы утилизации стеклопластиков – вторичная переработка, которая позволяет получать из образующихся отходов дополнительные вторичные материалы для различных отраслей промышленности, тем самым предотвращая загрязнение окружающей среды [5]. Наиболее перспективным и экологически безопасным методом переработки стеклопластиков является механический метод. К достоинствам данного метода можно отнести его универсальность, отсутствие негативного влияния на окружающую среду, простота и доступность, а также возможность осуществлять непрерывную переработку отходов в больших объемах. Однако, данный метод не лишен недостатков, основным из которых является снижение прочностных свойств волокон после переработки, в сравнении с первичным материалом. В результате, важной задачей является поиск технологических и конструктивных параметров измельчающего оборудования стеклопластиков, с целью получения вторичных материалов приемлемого качества для их использования в различных отраслях промышленности.

Методы исследования и полученные результаты.

Механической переработке подвергались отходы производства стеклопластиковых изделий полученные на предприятии ООО «Полоцк-Стекловолокно». Отходы представляли собой куски хаотически армированного коротким волокном стеклопластика с размером $240 \times 90 \times (2-3)$ мм, состоящего из связующего на основе полиэфирной смолы Депол С-180 ПТ (60–63 %) (рисунок 2а).

Исследования осуществлялись на лабораторной экспериментальной установке, представленной на рисунке 1.



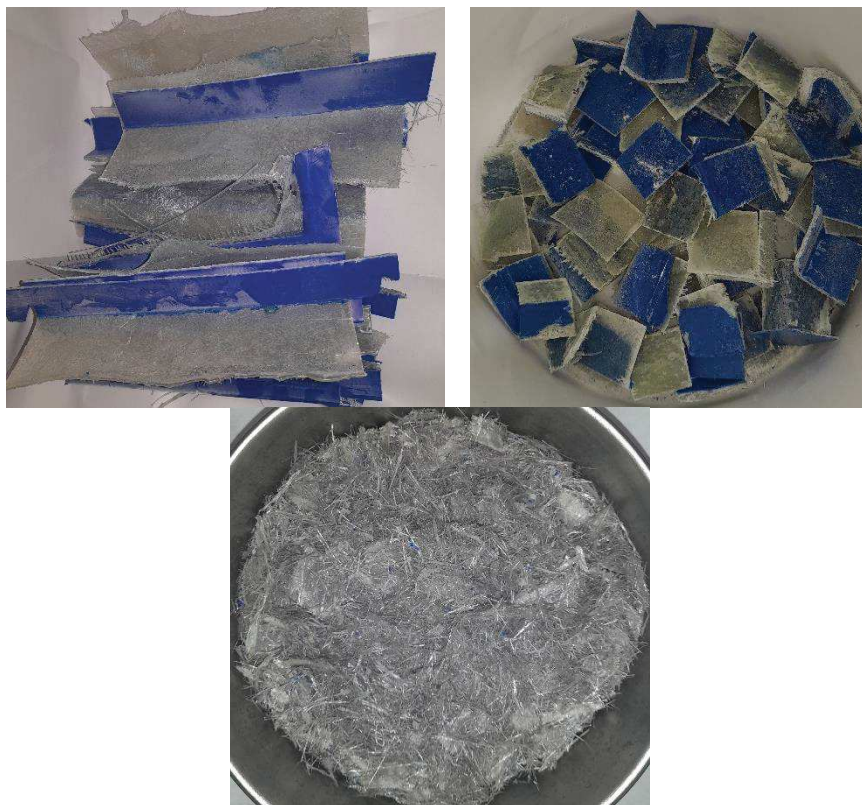
1 – питатель; 2 – ударно-центробежная мельница; 3 – частотный преобразователь; 4, 7 – трубопроводы; 5 – циклон; 6 – емкость сбора продуктов измельчения; 8 – рукавный фильтр; 9 – емкость сбора пыли; 10 – ситовой анализатор

Рисунок 1 – Экспериментальная установка исследования процесса механической переработки отходов стеклопластика

Экспериментальная установка состоит из питателя 1, ударно-центробежной мельницы 2, частотного преобразователя 3. Посредством трубопровода 4, к ударно-центробежной мельнице 2 подсоединен циклон 5 с емкостью сбора продуктов измельчения 6. К циклону 5, при помощи трубопровода 7, подсоединен рукавный фильтр 8 с емкостью сбора пыли 9. Для проведения ситового анализа продуктов измельчения в установке имеется ситовой анализатор 10.

Исследования осуществлялись следующим образом. Исходный материал подвергался первоначальной ручной резке до более мелких кусков с размерами 30×30×(2–3) мм (рисунок 2б), что обосновывалось конструктивными особенностями ударно-центробежной мельницы. Далее, полученный материал, посредством питателя 1 с постоянным массовым расходом (100 кг/ч) подавался в ударно-центробежную мельницу 2. Используя частотный преобразователь 3 в ударно-центробежной мельнице 2 задавалась различная частота вращения рабочего органа мельницы (ротора) n , об/мин: 1200, 1800, 2100, 2400, 2700 и 3000. Далее, продукты измельчения совместно с воздушным потоком, по трубопроводу 4 направлялись в циклон 5, где происходило их разделение. Извлеченные из воздушного потока продукты измельчения поступали в емкость 6. Воздушный поток, после циклона 5, по трубопроводу 7 поступал на дополнительную стадию фильтрования в рукавный фильтр 8, после чего выделенные мелкие частицы поступали в емкость 9. Полученные продукты измельчения отходов стеклопластика, из емкостей 6 и 9 с целью рассева на фракции, помещали в ситовой анализатор 10 марки Retsch AS 200 с комплектом сит, мм: 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063.

В результате проведения экспериментальных исследований механической переработки отходов стеклопластика в разработанной экспериментальной установке, с последующим рассевом на ситах, было получено три основных фракции: крупная, состоящая из недоизмельченных кусков стеклопластика, которые в последствии нуждаются в повторной переработке (рисунок 3а); средняя фракция (остаток на сите 4 мм) – состоящая преимущественно из волокнистого материала с размером волокон от 7 до 25 мм (рисунок 2в); мелкая фракция (прошедшая через сито 4 мм) – представляет собой порошок, состоящий из измельченного стекловолокна и частиц полимерной матрицы.



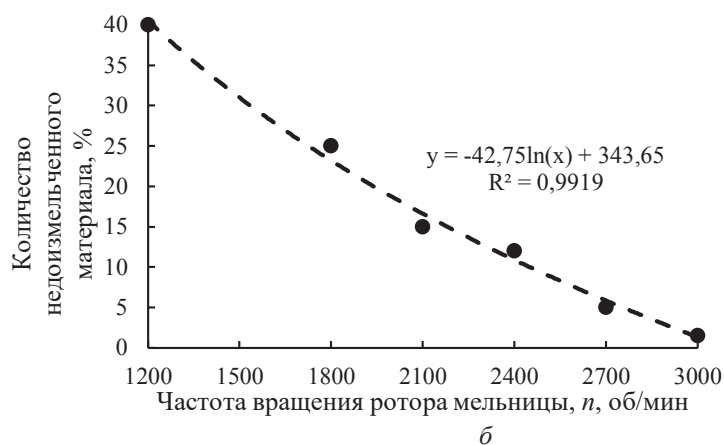
а – отходы стеклопластика; б – отходы стеклопластика после ручной резки;
в – остаток на сите 4 мм после механической переработки при $n = 2400$ об/мин

Рисунок 2 – Стадии механической переработки отходов стеклопластика

На рисунке 3 представлена графическая зависимость влияния частоты вращения ротора на выход крупной фракции.

Установлено, что увеличение частоты вращения ротора ударно-центробежной мельницы способствует более полному измельчению отходов стеклопластика. При $n = 1200$ об/мин, количество недоизмельченного материала составляет 40,0 %, при 2100 об/мин – 15,0 %, 3000 об/мин соответственно 1,5 %. Полученную зависимость, приближенно можно представить в виде уравнения логарифмической кривой, представленной на рисунке 3б, что позволяет прогнозировать результаты измельчения с разностью с экспериментальными данными не более чем в 11,0 %.

Также, необходимо обратить внимание на вид недоизмельченных кусков стеклопластика (рисунок 3а), они имеют эллиптическую форму. Данный вид недоизмельченных кусков может говорить о том, что основной механизм разрушения стеклопластика в ударно-центробежной мельнице заключается в постепенном разрушении наружных кромок хрупкого термореактивного полимера с каждым последующим ударом об отбойную поверхность с высвобождением волокон.



а – неизмельченные отходы стеклопластика; б – влияние частоты вращения ротора на количество неизмельченного материала

Рисунок 3 – Влияние частоты вращения ротора на количество неизмельченного материала

На рисунке 4 представлен результат ситового анализа продуктов механической переработки отходов стеклопластика за вычетом неизмельченного материала.

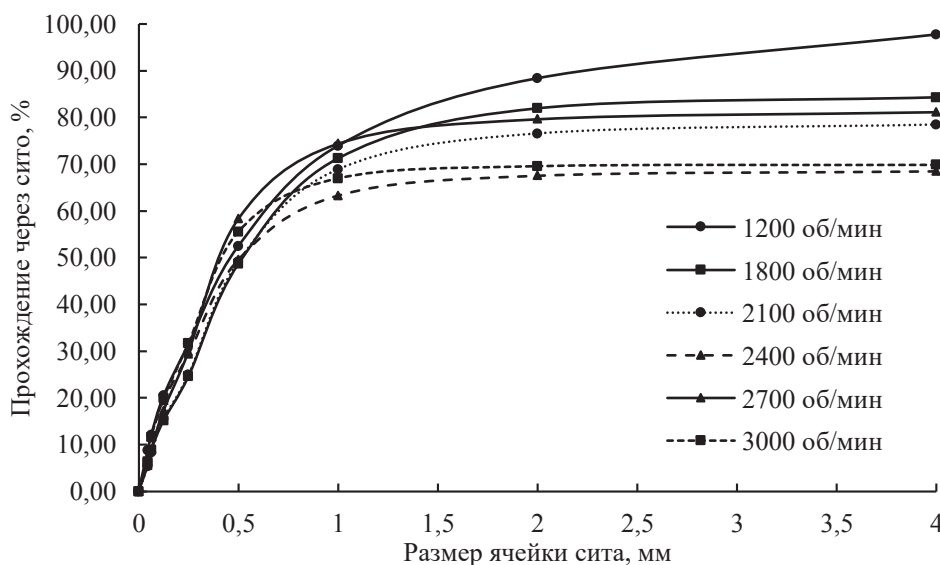


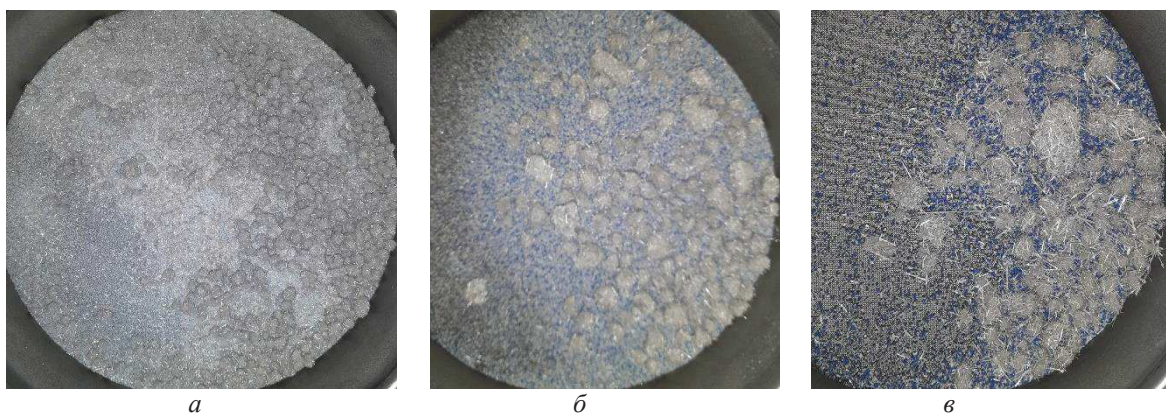
Рисунок 4 – Ситовый анализ продуктов механической переработки отходов стеклопластика

Установлено, что количество волокнистой фракции в продуктах механической переработки отходов стеклопластика напрямую зависит от частоты вращения рабочего органа мельницы. При минимальной частоте вращения ротора ($n = 1200$ об/мин), количество волокнистой фракции (остаток на сите 4 мм) составило всего 2,26 %. При этом, данная фракция представляет собой преимущественно пучки волокон, соединенных между собой неизмельченной полимерной матрицей. При увеличении частоты вращения до 2400 об/мин наблюдается постепенное увеличение количества волокнистой фракции. Количество волокон скрепленных полимерной матрицей уменьшается, о чем говорит уменьшение плотности распущенного волокна. Увеличение количества выделенного волокна из полимерной матрицы объясняется тем, что энергия удара отходов стеклопластика, происходящего в ударно-центробежной мельнице об отбойную поверхность, превышает энергию хрупкого разрушения матричного полимера, но не достаточна для разрушения волокна. Следовательно, чем больше энергия удара в мельнице, тем больше выделяется волокон, при условии, что кинетическая энергия удара не превышает удельную энергию разрушения волокна. При это, при n равному 2700 и 3000 об/мин наблюдается уменьшение количества волокнистой фракции, что, как было сказано

ранее, может быть связано с превышением кинетической энергии удара выше удельной энергии разрушения волокна.

Необходимо отметить, что в процессе классификации волокнистого материала на сите 4 мм, волокна скрепляются между собой и образуют на поверхности сита сплошной мат, в котором задерживаются частицы полимерной матрицы, тем самым снижая общее количество стекловолокна в волокнистой фракции. Также, в полученной фракции присутствуют волокна различной длины, что практически невозможно предотвратить при механической классификации.

В процессе классификации продуктов измельчения на ситах с отверстиями меньшего размера, происходит образование «пушистых комков» (рисунок 5), которые содержат в себе мелкие волокна и частицы измельченной полимерной смолы, которые в противном случае были бы классифицированы по последующим ситам с меньшим диаметром отверстий. По мере того, как они накапливаются на поверхности сит, они предотвращают прохождение дальнейших волокон и частиц через поверхность сита [6]. При увеличении частоты вращения ротора до 2700 и 3000 об/мин наблюдается увеличения их количества на ситах с размером ячейки 0,045 – 0,5 мм, что говорит об увеличении количества более мелкого измельченного волокна.



a – остаток на сите с размером ячейки 0,063 мм; *б* – остаток на сите с размером ячейки 0,25 мм; *в* – остаток на сите с размером ячейки 0,5 мм

Рисунок 5 – Образование «пушистых комков» при классификации продуктов измельчения стеклопластика

Закключение. В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что метод механической переработки стеклопластика с использованием в качестве измельчающего оборудования ударно-центробежной мельницы позволяет выделить из отходов стекловолокно, которое в дальнейшем может быть использовано в качестве армирующего компонента в новых изделиях. Установлено, что при частоте вращения ротора 2400 об/мин наблюдаются наиболее рациональные параметры процесса измельчения стеклопластика с наибольшим выходом волокнистой фракции. При меньших значениях частоты вращения ротора, в волокнистой фракции преобладают пучки волокон, скрепленных между собой неизмельченной полимерной матрицей, при больших значениях происходит измельчение волокон. Выявлено, что механическая классификация продуктов измельчения стеклопластика имеет ряд недостатков, негативно влияющих на качество волокнистой фракции, что говорит о необходимости проведения ряда дополнительных исследований в данном направлении.

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 (34). – С. 3–33.



2. Дориомедов, М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 6-7 (89). – С. 29-37
3. Жихарев, М. В. Оценка прочности высоконагруженных пластин из композитных материалов при локальном ударном воздействии/ дисс... канд. техн. наук, Челябинск, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский гос. ун-т, 2019. – 125 с.
4. 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.
5. Петров, А.В., Дориомедов М.С., Скрипачев С.Ю. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2015. – №8. – С. 62–73.
6. Jutte, R.B. and W.D. Graham, Recycling SMC scrap as a reinforcement, in *Plastics Engineering*. 1991. p. 13-16.