

УДК 678.023

Е. И. Кордикова, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);
А. В. Спиглазов, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);
Д. И. Чиркун, кандидат технических наук, старший преподаватель (БГТУ);
Е. А. Купраш, инженер (БГТУ, г. Минск)

УТИЛИЗАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Предложен способ переработки стеклопластиков для получения волокнистой составляющей, применяемой в качестве армирующего наполнителя для изготовления вторичных композиционных материалов. Теоретически показано и экспериментально подтверждено влияние режимов работы ударно-центробежной мельницы для получения волокнистой составляющей с наибольшим содержанием волокон с длиной больше эффективной. Полученные аналитические зависимости могут быть использованы для разработки конструкции элементов мельницы, а также при оптимизации режимов процесса измельчения.

The rehash expedient fibreglass for deriving of the filamentary component applied of in the capacity of reinforcing filler for fabrication of the sec composites is tendered. It is idealised displayed and experimentally agency of duties of the is shock-centrifugal crumber for deriving of a filamentary component with the greatest content of filaments with length more than the effective is affirmed. The gained analytical dependences can be used for development of a construction of devices of the crumber, and as by optimisation of a process conditions of refinement.

Введение. Волокнистые композиционные материалы на основе стеклянных волокон и полимерной матрицы обладают высокой прочностью, стойкостью к воздействию повышенных температур, химических веществ, воды и атмосферных факторов, поэтому нашли широкое применение при производстве транспортных средств, строительных конструкций и других изделий конструкционного назначения. Но эти же свойства, положительные для эксплуатации изделий, затрудняют переработку отходов производства и утилизацию изделий, отработавших установленный срок. В связи с расширяющимися объемами производства и применения изделий из волокнистых композиционных материалов и одновременно повышающимися экологическими требованиями проблема утилизации оказывается все более актуальной.

По экономическим и экологическим соображениям наиболее привлекательны технологии рециклинга композиционных материалов, обеспечивающие повторное использование компонентов. В первую очередь интерес представляют высокопрочные армирующие волокна в качестве наполнителя термопластичных полимеров для получения вторичных композиционных материалов. Эти материалы пригодны для изготовления изделий конструкционного назначения одним из известных способов – литьем под давлением, прессованием, экструзией и т. п.

Цель исследования – повышение прочности вторичного композиционного материала, получаемого в результате утилизации изделий за счет оптимизации процессов измельчения и получения высокой доли в измельченном продукте волокон с длиной больше эффективной.

Основная часть. При утилизации изделий из волокнистого композиционного материала предложена следующая схема: утилизируемый продукт нарезают на куски (размеры зависят от исполнения мельницы, но не более 100 мм), затем их обрабатывают в ударно-центробежной мельнице с отражателями; волокнистую фракцию, выделенную из измельченного продукта, совмещают с измельченными отходами термопластичных полимеров, в частности полиэтилена, полипропилена, полиамида, полиэтилентерефталата или их смесей; из полученной в экструдере пластицированной композиции (вторичного композиционного материала) формируют изделие.

Известно [1], что армирующие волокна в полной мере реализуют свою прочность в композиционном материале лишь в том случае, если их длина L не меньше так называемой эффективной длины, определяемой соотношением:

$$L \geq (\sigma_b d) / (2\tau), \quad (1)$$

где σ_b – разрушающее напряжение при растяжении волокон; d – средний диаметр волокон; τ – прочность адгезионной связи между волокном и матричным полимером во вторичном волокнистом композиционном материале, определяемая экспериментально, например по методу фрагментации [2].

Волокна стекла, связанные исходным матричным полимером и образующие частицы неопределенной формы, утрачивают армирующую способность, и, как следствие, прочность вторичного композиционного материала оказывается низкой. Ввиду интенсивного механического воздействия в мельнице на куски утилизируемого

продукта длина волокон в измельченной массе оказывается меньше эффективной и потому недостаточна для полной реализации прочности волокон во вторичном композиционном материале.

Невысокая и неоднородная прочность адгезионной связи высокопрочных армирующих волокон с термопластичными полимерами также препятствует получению прочных вторичных материалов, снижая тем самым эффективность процесса утилизации.

Для разрушения матричного вещества (и связи между волокнами) кинетическая энергия частиц матрицы в момент удара об отражатель ударно-центробежной мельницы должна превышать удельную энергию разрушения этого компонента. Волокна при этом не должны разрушаться, поэтому их кинетическая энергия должна быть меньше удельной энергии хрупкого разрушения.

При частоте вращения n ротора радиусом R ударно-центробежной мельницы скорость v куска в момент удара об отражатель равна $\pi n R / 30$, кинетическая энергия единицы объема матрицы равна $\rho_m v^2 / 2$, а кинетическая энергия единицы объема волокна – $\rho_v v^2 / 2$.

Удельная энергия хрупкого разрушения единицы объема матричного вещества [1], имеющего модуль Юнга E_m и разрушающее напряжение при растяжении σ_m , равна $\sigma_m^2 / 2E_m$. Удельная энергия хрупкого разрушения единицы объема армирующего волокна равна соответственно $\sigma_v^2 / 2E_v$ [1].

Из приведенных формул следуют приближенные соотношения между показателями свойств компонентов и частотой вращения n ротора ударно-центробежной мельницы, при которых обеспечивается разрушение матрицы, но волокна не разрушаются, а именно:

$$30\sigma_m / (\pi R \sqrt{E_m \rho_m}) \leq n \leq 30\sigma_v / (\pi R \sqrt{E_v \rho_v}). \quad (2)$$

Структура волокнистых композиционных материалов неоднородна, а показатели свойств компонентов имеют разброс, поэтому предпочтительно задавать частоту вращения ротора примерно равной среднему значению границ, указанных в соотношении (2), а именно:

$$n = 15 \left[\sigma_m / (\pi R \sqrt{E_m \rho_m}) + \sigma_v / (\pi R \sqrt{E_v \rho_v}) \right], \quad (3)$$

где σ_m – разрушающие напряжения при растяжении матрицы; E_m , E_v , ρ_m , ρ_v – модули Юнга и плотности матрицы (индекс «м») и армирующих волокон (индекс «в») в утилизируемом изделии из волокнистого композиционного материала соответственно.

Если выполняется условие (2), то в процессе измельчения создаются наиболее благопри-

ятные условия для отделения волокнистой фракции от матрицы, т. е. энергия удара превышает энергию хрупкого разрушения матричного полимера, но не достаточна для разрушения волокон. Это способствует увеличению доли волокон большей длины в продукте измельчения. Высокая доля длинных волокон во вторичном композиционном материале обеспечивает более высокую его прочность при растяжении, изгибе и сжатии [1].

Применение формулы (3) упрощает задание частоты вращения ротора, необходимой для измельчения первичного композиционного материала при сохранении наибольшей длины волокон, и сокращает затраты времени на отработку подходящих режимов.

Для проверки предлагаемых решений утилизировали бракованные изделия из стеклопластика контактного формования на основе полиэфирной смолы ПН-1. Плотность стекла $2,5 \text{ г/см}^3$, модуль Юнга $E_b = 70 \text{ ГПа}$. Средний диаметр волокон $d = 6 \text{ мкм}$, среднее значение разрушающего напряжения при растяжении волокон $\sigma_b = 2,5 \text{ ГПа}$. Плотность матрицы $\rho_m = 1,2 \text{ г/см}^3$, модуль Юнга $E_m = 3 \text{ ГПа}$, среднее значение разрушающего напряжения при растяжении $\sigma_m = 35 \text{ МПа}$. Эти показатели приводятся в справочной и учебной литературе, при необходимости они могут быть уточнены в результате испытаний известными методами [2].

В качестве матрицы для вторичного композиционного материала использовали смешанные отходы полипропилена и АБС-пластика, образующиеся при замене материала в рабочем цилиндре литьевой машины. Прочность адгезионной связи τ между такой матрицей и стеклянными волокнами, найденная по методу фрагментации волокон [2], составляет $\approx 1 \text{ МПа}$. Эффективная длина стеклянных волокон во вторичном композиционном материале, рассчитанная по формуле (1), и ее среднее значение, найденное по методу фрагментации, равны примерно 4 мм .

Отходы стеклопластика контактного формования предварительно разделяли на куски с размерами $20\text{--}30 \text{ мм}$, превышающими указанное выше значение эффективной длины волокон во вторичном композиционном материале.

Измельчения кусков стеклопластика осуществляли в ударно-центробежной мельнице с диаметром ротора 450 мм ($R = 225 \text{ мм}$). Длина разгонных лопаток составляла 150 мм , длина отражателей – 100 мм .

Из соотношения (2), при указанных выше показателях свойств, следует, что рабочая частота вращения ротора находится в диапазоне $750 \text{ мин}^{-1} \leq n \leq 2850 \text{ мин}^{-1}$, а среднее значение, вычисленное по формуле (3), равно 1800 мин^{-1} .

Показатели структуры и прочности вторичного композиционного материала

Показатель	Частота вращения ротора, мин ⁻¹						
	750	1200	1600	1800	2000	2400	2850
Доля волокон, длина которых больше эффективной, мас. %	12	34	46	51	48	38	16
Изгибающее напряжение при разрушении, МПа	24	36	42	45	41	39	28

Для экспериментальной отработки режимов измельчения частоту вращения ротора задавали в шести точках указанного диапазона и, в частности, равной среднему значению. Измельчение кусков стеклопластиков одной партии осуществляли для каждого из принятых значений частоты. Получаемый на выходе из мельницы продукт отсеивали на лабораторных ситах, отделяя волокнистые фракции. Взвешивая фракции, определяли массу волокон, средняя длина которых превышает указанную выше эффективную длину (4 мм).

Как следует из результатов эксперимента, P – доля в измельченном продукте волокон, имеющих длину L больше эффективной, существенно зависит от частоты вращения ротора мельницы, при этом характерно наличие ее максимального значения в рассчитанном ранее интервале значений частоты с учетом свойств компонентов.

В продукте, получаемом в ударно-центробежной мельнице при частоте вращения ротора менее 750 мин⁻¹, т. е. менее нижней границы в соотношении (2), наблюдается значительная доля неизмельченных кусков. Поэтому доля выделенных из этого продукта волокон менее 10 мас. %. При частоте вращения 750 мин⁻¹ доля волокон, длина которых больше эффективной, составила 12 мас. %.

При частоте вращения ротора более 2850 мин⁻¹, т. е. больше верхней границы в соотношении (2), в измельченном продукте преобладают мелкие фракции в виде смеси коротких волокон и частиц матричного полимера, но доля волокон, длина которых больше эффективной, также мала (менее 10%).

При значении $n = 1800$ мин⁻¹, вычисленном по формуле (3), доля волокон P , длина которых превышает эффективную, близка к максимальной (примерно 0,5) для продукта, получаемого из утилизируемого изделия.

Компоненты вторичного композиционного материала (измельченные отходы, полученные после обработки кусков в ударно-центробежной мельнице без классификации; матричный полимер – смесь полипропилена и АБС-пластика) совмещали в дисковом экструдере (диаметр диска 200 мм, частота вращения 100 мин⁻¹, температура расплава 280°C). Степень наполнения в композициях задавали постоянной и равной 40 мас. % независимо от режимов измельчения стеклопластика.

Из полученной композиции прессовали изделия в виде короба с размерами 250×250 мм. Из плоского дна изделия толщиной 4 мм вырезали образцы для испытаний на изгиб (по 5–6 для каждого варианта).

Данные о доле выделенной волокнистой фракции и полученного на ее основе вторичного композиционного материала приведены в таблице.

Из таблицы видно, что вторичная волокнистая композиция, полученная по предлагаемому способу, содержит наибольшую (из числа исследованных вариантов) долю волокон (51 мас. %), длина которой превышает эффективную, и прочность ее при изгибе также наибольшая (45 МПа).

Заключение. Предлагаемый аналитический способ определения режимов процесса измельчения решает задачу выбора предпочтительных параметров работы мельницы в зависимости от ее функциональных размеров и свойств компонентов в волокнистом вторичном композиционном материале. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость длины волокон в измельченном продукте от энергии удара. Сохранение длины волокон в измельченной массе дает возможность вдвое увеличить прочностные характеристики вторичного композиционного материала. Полученные аналитические зависимости частоты вращения ротора от свойств компонентов первичного композиционного материала и геометрии мельницы позволяют отказаться от проведения трудоемких экспериментальных исследований по отработке режимов измельчения.

Результаты могут быть использованы на предприятиях по производству изделий из волокнистых композиционных материалов, в частности стеклопластиков контактного формования на ОАО «Осиповичский завод автомобильных агрегатов», СП «Липласт», ООО «Белкарпластик», СП «СМИавтотранс» и др.

Литература

1. Ставров, В. П. Механика композиционных материалов: учеб. пособие / В. П. Ставров. – Минск: БГТУ, 2008. – С. 165.
2. Композиционные материалы. Лабораторный практикум / Е. И. Кордилова. – Минск: БГТУ, 2007. – С. 122–124.

Поступила 28.02.2013