

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ СОВМЕЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ В ЧЕРВЯЧНОМ ЭКСТРУДЕРЕ НА ПРОЧНОСТЬ СТЕКЛОАРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

Ставров В. П., Шубенкова Е. В.

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь
vpstavrov@user.unibel.by

Введение

Термопластичные полимеры, армированные непрерывными и длинными стеклянными волокнами, относятся к перспективным конструкционным материалам [1-4]. Однако вследствие высокой вязкости расплавов термопластичных полимеров затруднено совмещение их с волокнистыми наполнителями. Высокая производительность компаундирования и однородность композиции могут быть достигнуты при совмещении в червячном экструдере. В то же время известно, что высоких скоростях и накопленных деформациях сдвига волокон интенсивно разрушаются, и потому снижается прочность получаемого материала [4-7]. Теоретические основы совмещения волокон с полимерным расплавом в червячном экструдере разработаны недостаточно, чтобы управлять процессом по критерию прочности получаемого материала.

Цель данной работы – установление на основе анализа условий разрушения хрупких стеклянных волокон, совмещаемых с полимерным расплавом в винтовом канале червячного экструдера, количественных характеристик связи между параметрами процесса экструзии, длиной волокон и прочностью получаемых композиций.

Метод оценки прочности материала. При течении в винтовом канале червячного экструдера перемещения и скорости частиц полимерной композиции имеют продольную составляющую, зависящую от градиента давления по длине червяка, и циркуляционную составляющую, зависящую от реологических свойств расплава и параметров поперечного сечения канала.

Полимерный расплав обычно считали нелинейно-вязкой жидкостью со степенным законом течения. Параметры закона течения – коэффициент консистенции и показатель степени, определяемые экспериментально и существенно зависящие от природы полимера и от температуры. В качестве обобщенной характеристикой реологических свойств расплавов в процессе течения принимали эффективную вязкость

$$\mu_s = \mu \cdot \dot{\gamma}^{n-1}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент консистенции; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; n – показатель степени в законе течения полимера.

Степенной закон течения имеет и композиция полимерного расплава с наполнителем при малых концентрациях наполнителя (если его объемная доля $P_a = 0,1-0,3$). Коэффициент консистенции композиции оценивали по приближенной формуле [4]

$$\mu = \mu_m \cdot (1 - P_a)^{-n}, \quad (2)$$

где μ_m – коэффициент консистенции, n – показатель степени в законе течения матричного полимера.

Распределение скоростей частиц, скоростей сдвига и накопленных деформаций сдвига по поперечному и продольному сечениям находили на основе математической модели течения расплава в канале червячного экструдера [6]. По этим параметрам рассчитывали положение волокон и действующие на них силы.

Возможны два механизма разрушения хрупких стеклянных волокон, движущихся в канале червяка вместе с полимерным расплавом [8]. Искривление волокон, конфигурация которых на различных участках изменяется в процессе перемещения, приводит к разрушению от напряжений изгиба (рис. 1).

Координаты волокна в поперечном и продольном сечениях канала, отсчитываемые от некоторого исходного положения, и результирующее перемещение волокон находили по скоростям частиц расплава в циркуляционном и продольном движениях. Затем по известным формулам вычисляли радиусы кривизны волокон в сечениях и в пространстве как функции координат. Полагали, что разрушение волокна диаметром d произойдет в результате изгиба, если радиус кривизны достигнет значения

$$R^* = d \cdot E / 2 \cdot \sigma_a, \quad (3)$$

где σ_a – разрушающее напряжение; E – модуль Юнга.

Длину фрагмента, получаемого после разрушения волокна, вычисляли по формуле

$$l^* = \int_{y_0}^{y^*} \sqrt{1 + x'(y)^2} dy, \quad (4)$$

где y_0 – ордината конца волокна; y^* – ордината сечения, в котором кривизна волокна достигла критического значения.

Распределение длины фрагментов, образующихся после разрушения при изгибе, строили, предполагая, что ординаты y_0 распределены равномерно по сечению канала.

При обтекании длинного волокна, один конец которого закреплен (находится в области малых скоростей), на поверхности действуют касательные напряжения, обуславливающие растягивающие напряжения в волокне (рис. 2).

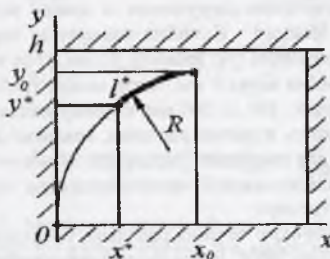


Рис. 1. Схема изгиба волокна (h – глубина канала) Рис. 2. Схема растяжения волокна

Касательные напряжения на поверхности волокна находили из условия течения вдоль его оси прослойки расплава, окружающей это волокно. Диаметр элементарной цилиндрической ячейки, показанной на рис. 2, равен $d/\sqrt{P_a}$, где d – диаметр волокна; P_a – объемная доля волокна в ячейке, принимаемая равной объемной степени наполнения расплава волокнами. Тогда скорость сдвига на поверхности волокна, вытягиваемого со скоростью v , равна

$$\dot{\gamma} = 2\nu(1-n) \left[d \cdot n(1 - P_a^{(1/n-1)/2}) \right]^{-1} \quad (5)$$

Волокно разрушается, если напряжения от равнодействующей сил на его поверхности достигают разрывного напряжения σ_a . Полагая, что касательные напряжения τ распределены равномерно, из этого условия находили длину отрываемого фрагмента волокна $l' = \sigma_a d / 2\tau$. Подставив сюда формулу касательное напряжение, выраженное через скорость сдвига согласно (5), рассчитанную из условий течения расплава, получали длину отрываемых фрагментов волокон как функцию показателей реологических свойств композиции и скорости течения. Распределение длины волокон в композиции находили, приняв, что волокна равномерно распределены по сечению канала.

Возможность разрушения волокон по двум изложенным выше механизмам дает основания предположить, что распределение их длины в композициях, получаемых в результате совмещения с полимерным расплавом в червячном экструдере, может быть представлено комбинацией двух законов распределения, каждый из которых характеризует один из механизмов. Это подтверждается результатами эксперимента [8].

Прочность при растяжении материала, хаотически армированного волокнами, оценивали, используя модифицированную формулу Келли-Гайсона [9]

$$\sigma^* = \sigma_c(1 - P_a) + k_c P_a \left[2 \left(\frac{\tau_c}{d} \right) \cdot \int_0^{l_c} z \cdot f_\lambda(z) dz + \sigma_a \cdot \int_{l_c}^{l_0} f_\lambda(z) dz \right], \quad (6)$$

где σ_c – прочность при растяжении полимера; τ_c – прочность адгезионной связи на границе волокно-полимер; σ_a – прочность волокна при растяжении; k_c – коэффициент, учитывающий ориентацию волокон ($k_c = 0,3-0,6$); l_0 – исходная, l_c – критическая длина волокон, определяемая из условия равенства прочности волокна и сил сцепления на его поверхности; $f_\lambda(z)$ – плотность распределения длины волокон.

Результаты расчета и их обсуждение

Расчет параметров течения расплава, критериев разрушения и длины волокон проводили численно с применением пакета Mathcad. Приняты параметры червяка, близкие к значениям, имевшим место в экспериментах [8]: диаметр 32 мм, угол подъема винтовой линии нарезки $17^\circ 42'$, ширина гребня витка 4 мм, зазор между гребнем и цилиндром 0,3 мм. Варьировали длину червяка от 100 до 500 мм, глубину канала от 3 до 5 мм, частоту вращения от 2 до 5 об/с, вязкость и расход расплава, градиент давления по длине червяка. Следует заметить, что два последних параметра не могут быть заданы произвольно, поскольку при каждой фиксированной частоте вращения червяка они связаны между собой характеристической частотой вращения червяка.

Задавали значения параметров закона степенного течения расплава, типичные для полипропилена (ПП) при температурах от 200 до 280°C и для полиэтилентерефталата (ПЭТФ) при температурах от 270 до 300°C . При расчетах приняты следующие значения параметров волокон, типичные для стеклоровинга ЕС13-2400: $d = 13$ мкм; $\sigma_a = 1$ ГПа; $E = 70$ ГПа; условие разрушения при изгибе $R^* = 0,45$ мм.

Рассчитывали длину фрагментов, получаемых в результате разрушения волокон в результате изгиба и растяжения. Строили плотности распределения длины волокон после разрушения.

В исследованном диапазоне параметров матричного полимера и процесса компандирования длина фрагментов, образующихся при разрушении от изгиба, значительно меньше, чем фрагментов, получающихся после разрыва волокон (рис. 3 и 4).

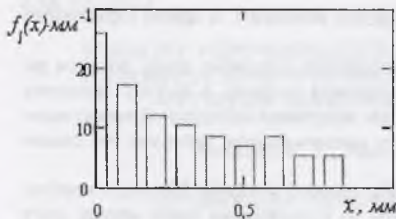


Рис. 3. Распределение длины фрагментов, образующихся при разрушении от изгиба

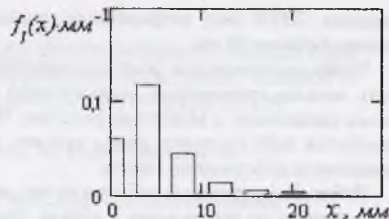


Рис. 4. Распределение длины волокон после разрыва

Наиболее вероятно разрушение волокон от изгибающих напряжений в начальный период их перемещения в винтовом канале червяка. Как длина фрагментов волокон, так и разрушающее напряжение для материала, вычисленное по формуле (6), определяют, в первую очередь, именно этим механизмом.

Расчеты показали, что снизить поврежденность волокон от изгиба можно за счет увеличения глубины канала червяка (рис. 5).

Установлено также, что при фиксированных значениях расхода и градиента давления средняя длина фрагментов, образующихся в результате изгиба волокон, и прочность материала возрастают по мере увеличения эффективной вязкости композиции (рис. 6). Этот факт объясняется тем, что с увеличением эффективной вязкости расплава уменьшается кривизна волокна в поперечном сечении канала (см. рис. 1).

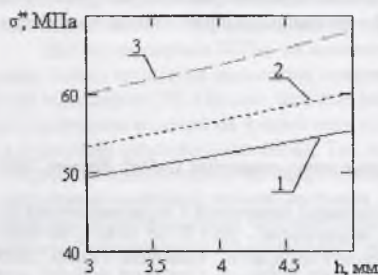


Рис. 5. Зависимость прочности при растяжении от глубины канала червяка при эффективной вязкости: 1 – 50 Па·с; 2 – 66; 3 – 100 Па·с.

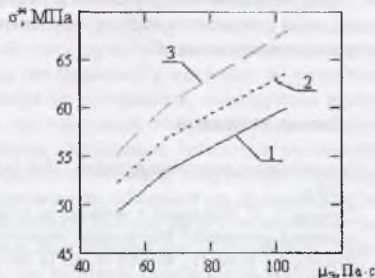


Рис. 6. Зависимость прочности при растяжении от эффективной вязкости полимерного расплава при глубине канала червяка: 1 – 3 мм; 2 – 4 мм и 3 – 5 мм.

В то же время с увеличением вязкости композиции возрастает вероятность разрушения волокон путем разрыва. Наибольшие линейные скорости и скорости сдвига имеют частицы, движущиеся вблизи поверхности червяка. В этой области и наиболее вероятно разрушение волокон путем разрыва. С увеличением степени наполнения средняя длина волокон уменьшается, а доля волокон, разрушающихся путем разрыва, возрастает. При совмещении волокон с низковязкими расплавами вероятность разрушения волокон путем разрыва мала. Так, в случае совмещения стеклянных волокон с

расплавом ПЭТФ доля разрываемых волокон менее половины, а длина отрываемых фрагментов более 50 мм.

Чтобы предотвратить разрывы волокон, достаточно исходную длину волокон задавать меньше критической, определяемой из условия разрыва, а частоту вращения червяка согласовать с вязкостью расплава. Но для получения однородной композиции потребуются либо увеличить длину червяка, либо снизить расход, увеличив тем самым накопленную деформацию сдвига.

Избежать разрушения волокон путем изгиба намного сложнее. Для этого необходимо изменить их ориентацию в канале. Расчеты по изложенному выше методу дают основания для соответствующих конструктивных и технологических решений. В результате предложен способ компаундирования, позволяющий существенно снизить поврежденность хрупких стеклянных волокон и повысить прочность получаемого композиционного материала.

Выводы

На основе расчета параметров процесса течения матричного полимерного расплава и волокон в винтовом канале червячного экструдера установлены условия разрушения волокон и дана количественная оценка прочности получаемого материала как функции параметров процесса компаундирования.

Установлено, что наибольшее снижение длины армирующих волокон и прочности материала происходит в результате изгиба волокон в сечении винтового канала червяка. Увеличение глубины канала и эффективной вязкости композиции способствуют повышению прочности, но при этом возрастает вероятность разрушения волокон путем разрыва.

Предлагаемый метод расчета позволяет оптимизировать режимы экструзионного совмещения стекловолоконистых наполнителей с полимерными расплавами по критериям прочности композиций.

Список литературы

1. Comprehensive composite materials, Vol. 2. Polymer matrix composites. Oxford: Elsevier, 2000. – 759 p.
2. Ставров В. П. Механика и технология композиционных материалов с термопластичной полимерной матрицей // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2005, Т. 10, № 4, с. 94–100.
3. Henning F., Ernst H., Brüssel R. LFTs for automotive applications, *Reinforced Plastics*, 2005, Vol. 49, No 2, pp. 24–33.
4. Ставров В.П. (2006), *Формообразование изделий из композиционных материалов*, Минск: БГТУ – 482 с.
5. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров, М.: Химия, 1984. – 632 с.
6. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров, М.: Химия, 1977, – 456 с.
7. Ким В.С., Скачков В.В. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс, М.: Химия, 1988. – 239 с.
8. Ставров В.П., Шубенкова Е.В. Механизмы разрушения стекловолокна при совмещении с полимерным расплавом в червячном экструдере/ *The 4th Int. Symp. on Failure Mechanics of Materials and Structures*. - Augustów, 2007, pp. 251-254.
9. Ставров В.П., Шубенкова Е.В. Метод оценки ресурсосберегающего эффекта прямого компаундирования при изготовлении профильных изделий из стеклоармированных термопластов // *Материалы, технологии, инструменты*, 2007, Т. 12, № 1, с. 82–86.