

ТЕХНОЛОГИИ

УДК 678.073:678.027.9

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПУЛТРУЗИИ ПРОФИЛЕЙ ИЗ АРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

А. Л. НАРКЕВИЧ⁺, В. П. СТАВРОВ

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова 13а, 220050 г. Минск, Беларусь.

Исследованы условия оптимизации режимов пултрузии профилей из армированных термопластов при совмещенных в одной установке стадиях пропитки пучка волокон расплавом полимера, консолидации стренг и формообразования изделий. Соотношения, задающие границы допустимых температурных и силоскоростных режимов каждой стадии, получены из уравнений вязкого течения расплава, учитывающих особенности осуществления процесса. Установлены условия совмещения стадий и оптимизации параметров по критериям формирования заданной структуры материала в изделиях и максимальной производительности процесса.

Введение

Благодаря экологическим и экономическим преимуществам перед реактопластами, армированные термопласты начиная с 80-х гг. все шире применяются в изделиях конструкционного назначения. Наряду со ставшими уже традиционными литьем под давлением, прессованием и термоформованием длинноволокнистых термопластичных композиций, интенсивно разрабатываются непрерывные технологические процессы формообразования изделий из армированных термопластов с ориентированной структурой – укладка лент, намотка, пултрузия профилей, формование роликом [1–4]. Однако, по-прежнему актуальна проблема повышения производительности и снижения энергоемкости этих процессов.

Наибольшие затраты времени и энергии при изготовлении изделий из армированных термопластов возникают при плавлении матричного полимера, поэтому привлекательно совмещение основных стадий – пропитки, консолидации и формообразования. Это возможно, в частности, при пултрузионной пропитке пучков непрерывных волокон (нитей, ровинга) расплавом полимера и проведении последующих стадий – консолидации стренг или лент и формообразования изделия – без дополнительного нагрева материала. Совмещение стадий процесса достигается в результате оснащения пултрузионной установки консолидирующими и профилирующими устройствами (рис. 1). Такая установка может с минимальными затратами времени и средств перестраиваться на

изготовление изделий различной конфигурации из разных комбинаций волокнистых и матричных материалов. При этом последовательные стадии процесса должны быть согласованы по основным параметрам – температуре, скорости и усилию – с учетом требований, предъявляемым к каждой из этих стадий.

Цель исследования – разработка условий согласования и оптимизации параметров различных стадий совмещенного технологического процесса пултрузии профилей из армированных термопластов.

Теоретические основы

Вязкое течение расплава. На каждой стадии исследуемого процесса происходит вязкое течение матричного полимера. Полагаем, что оно подчиняется степенному закону:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где τ – касательное напряжение; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; μ – коэффициент консистенции; n – параметр среды.

Зависимость коэффициента консистенции от температуры принимаем в форме Аррениуса:

$$\mu_0 = \mu_0 \exp(E/RT), \quad (2)$$

где μ_0 – константа; E – энергия активации вязкого течения; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Температура формуемого материала на различных стадиях процесса определяется условиями

⁺ Автор, с которым следует вести переписку.

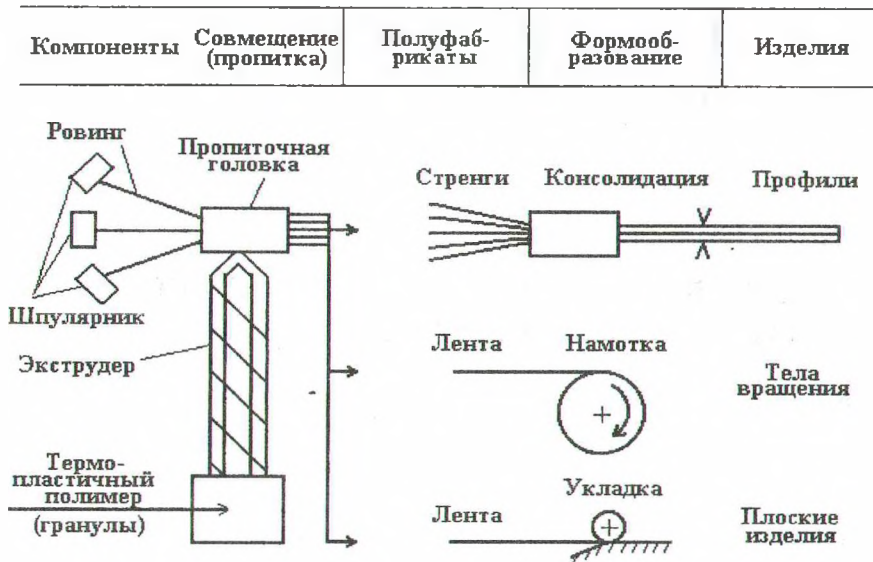


Рис. 1. Схема получения изделий из однонаправленных препрегов по одностадийной технологии

теплопередачи. Так, температура поверхности стренги, получаемой в результате пропитки волокнистого наполнителя расплавом полимера, через промежуток времени t в первом приближении равна:

$$T(t) = T_0 - (T_0 - T_a) B_r \exp(-a_r c_1^2 t), \quad (3)$$

где T_a – температура расплава на выходе из пропиточной головки; T_0 – температура окружающей среды; $B_r = \frac{2b_r}{r(b_r^2 + c_1^2)}$; $b_r = \alpha_0/k_r$; α_0 – коэффициент теплоотдачи; k_r – коэффициент теплопроводности в радиальном направлении; a_r – коэффициент температуропроводности; $c_1 = 0,55$; r – радиус стренги.

Выражение (3) после замены переменной $t = z/v$ (z – расстояние от пропиточной головки; v – скорость протягивания) дает зависимость температуры от расстояния и от скорости перемещения стренги.

Из закона течения (1) следует зависимость между усилием F и скоростью пултрузии v на различных стадиях процесса в виде степенной функции:

$$F = k(\mu, v)v^n. \quad (4)$$

Здесь $k(\mu, v)$ – коэффициент, зависящий от характера течения расплава на данной стадии процесса, от вязкости расплава и определяющих ее условий теплопередачи, включая скорость перемещения v .

Пропитка пучков волокон расплавом. При пропитке однонаправленного слоя волокон расплавом, находящимся между слоем и отклоняющимися криволинейными элементами (рис. 2), зависимость между натяжением и скоростью перемещения слоя имеет вид [5]:

$$F_1(v) = \mu(T, v) R_0^{1-n} b h_0^{1+n} [(1+s) K_e \varphi_0]^n v^n. \quad (5)$$

Здесь R_0 – радиус кривизны отклоняющего элемента; φ_0 – угол обхвата; b – ширина; h_0 – толщи-

на пропитанного слоя; K_e – эффективный коэффициент проницаемости волокнистого слоя; $s = 1/n$.

Для полной пропитки слоя толщиной h_0 с объемной долей волокон P_f необходима прослойка полимерного расплава толщиной $h_p = h_0(1 - P_f)$. Под давлением, которое создает натянутый слой волокон, возможно выдавливание полимера из прослойки. Натяжение волокнистого слоя, при котором между этим слоем и цилиндрической поверхностью радиусом R_0 существует прослойка полимера требуемой толщины h_p , равно:

$$F_1'(v) = \mu(T, v) (s+2)^n b^{n+2} (2h_0 R_0 - h_0^2)^{n/2} \times R_0^{1-n} \varphi_0 [2(n+2)h_p^{2n+1}]^1 v^n. \quad (6)$$

Соотношения (5) и (6) определяют граничные значения натяжения и скорости перемещения пучка волокон, при которых обеспечивается полная пропитка.

Консолидация. В рассматриваемых процессах консолидация происходит за счет вязкого течения полимера под давлением, создаваемым в результате натяжения сплавляемых стренг и лент на криволинейных поверхностях консолидирующего

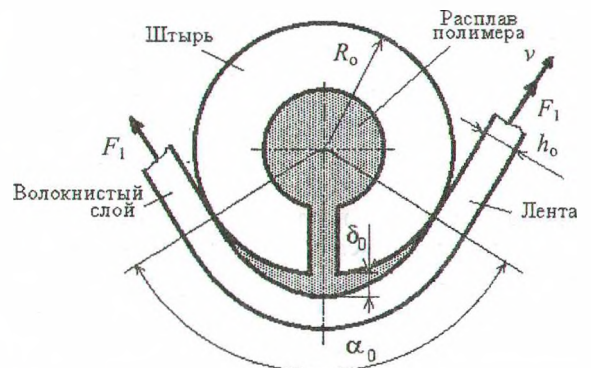


Рис. 2. Пропитка однонаправленного волокнистого слоя

ролика или оправки. Согласно перколяционной модели консолидации [6] связь между натяжением и скоростью протягивания, обеспечивающими консолидацию стренг или лент, записывается в виде

$$F_c(v) = \mu(T, v) R_c^{1-n} \varphi_c^{-n} b_c [f(c^*)v]^n, \quad (7)$$

где R_c – радиус кривизны; φ_c – угол обхвата; b_c – ширина консолидируемого слоя; $f(c^*)$ – функция степени консолидации c^* , зависящая от микрогеометрии сплавляемых поверхностей. В качестве показателя степени консолидации принято отношение прочности при сдвиге материала параллельно волокнам к максимальной возможной прочности (к когезионной прочности матричного полимера). При этом $f(c^*) = 0,9 \approx 1500$.

Смещение волокон в трансверсальной плоскости. При намотке натянутых стренг и лент и при пултрузии профилей происходит фильтрация полимерного расплава через пучки волокон. Это служит причиной смещения армирующих волокон в трансверсальной плоскости, изменения статического момента сечения и жесткости при изгибе, последующего изменения кривизны стержней при охлаждении. Смещение нейтральной оси сечения не должно превышать некоторого допустимого значения $\Delta y'$ (рис. 3). Зависимость смещения нейтральной оси сечения от натяжения и скорости протягивания профиля определяется в результате интегрирования дифференциального уравнения фильтрации полимерного расплава через стохастическую (в трансверсальной плоскости) систему однонаправленных пучков волокон [7]. В этом случае эффективный коэффициент проницаемости равен:

$$K_{fe}(v) = \Gamma(s + 2) \left[(\pi d_a (1 - v'_f)) / (8v'_f) \right]^{s+1}, \quad (8)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция; d_a – диаметр пучка; v'_f – доля площади сечения, заполненная пучками.

Связь между натяжением и скоростью протягивания пучков, при которых происходит задан-

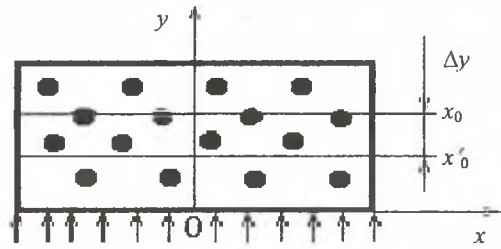


Рис. 3. Смещение нейтральной оси поперечного сечения

ное смещение нейтральной оси сечения, выражается формулой, подобной формуле (5):

$$F_f(v) = \mu(T, v) R_f^{1-n} A_f \left[(\Delta y' v) / (K_{fe} \varphi_f) \right]^n, \quad (9)$$

где A_f – площадь сечения ленты или профиля; R_f – радиус формообразующей поверхности; φ_f – угол обхвата.

Соотношения (5)–(9) для каждой комбинации компонентов и для каждого конкретного варианта технологии задают систему линий в координатах F – v , ограничивающих область параметров процесса, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к отдельным его стадиям (табл. 2).

Масса изделия, формируемого в единицу времени, равна:

$$Q = \rho A_f v, \quad (10)$$

где $\rho = \rho_f P_f + \rho_m P_m$ – плотность композита (ρ_a, ρ_b – плотность волокон и полимера; P_f, P_m – их объемные доли). Отсюда следует, что максимальной производительности процесса соответствует точка максимума скорости в области допустимых значений F – v .

Методика эксперимента

Эксперименты выполняли на пултрузионной установке (рис. 4), сконструированной на базе экструдера с диаметром червяка $D = 32$ мм длиной $25D$ [8]. Пропиточная головка с системой стержней обеспечивает одновременную пропитку 8 рвингов и получение стренг и лент с суммар-

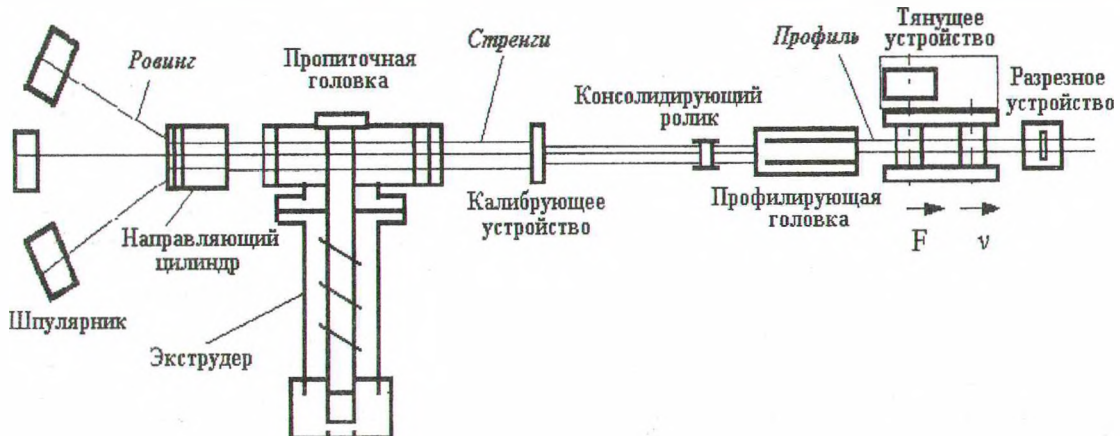


Рис. 4. Схема пултрузионной линии

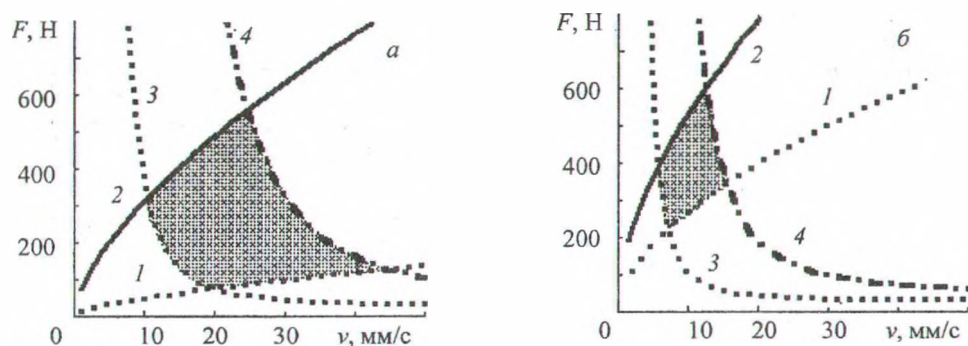


Рис. 5. Границы параметров пултрusion профилей из стеклоармированного полиамида-6 (а) и полипропилена (б) по формулам: 1 – (5); 2 – (6); 3 – (7); 4 – (9). Заштрихована область допустимых значений

ной площадью поперечного сечения до 100 мм². Скорость протягивания до 0,16 м/с. Максимальная производительность установки при изготовлении изделий на основе полиамида-6 – до 25 кг/ч, на основе полипропилена с ПТР 20 г/10мин – до 15 кг/ч. В качестве армирующего материала использовали стекловолокно с диаметром волокон 13 мкм и линейной плотностью 2400 и 5000 текс (изготовитель – ПО «Стекловолокно», Полоцк, Беларусь). Установка оснащена консолидирующими роликами и профилирующими устройствами для изготовления прямолинейных или криволинейных профилей.

При изготовлении профилей измеряли усилие пултрusion (на тянущем устройстве) и натяжение стренг, протягиваемых через пропиточное устройство. Контролировали температуру поверхности стренг (лент) и формируемых изделий на различных участках – от пропиточного до тянущего устройства. Определяли жесткость и прочность полученных профилей при растяжении и изгибе и прочность при межслойном сдвиге.

Результаты расчета и эксперимента и их обсуждение

Характеристики свойств матричных полимеров, использовавшихся в эксперименте (плотность ρ , коэффициент температуропроводности α , коэффициент консолидации μ , показатель степени в законе течения n и энергия активации вязкого течения E), приведены в табл. 1.

Границы режимов, при которых по исследуемой технологии могут быть получены профили с

поперечным сечением 25×4 мм из полиамида-6 и полипропилена, армированных 30 мас. % стекловолокна, показаны на рис. 5. Температура стренг рассчитана по формуле (3). Расстояние от пропиточной головки до консолидирующего ролика 0,8 м, до профилирующей головки – 1 м. Радиус и угол обхвата консолидирующего ролика 16 мм и 60°, формообразующей поверхности профилирующего устройства 35 мм и 15°, соответственно.

Допуск на смещение стренг в сечении профиля ($\Delta y' = 0,5$ мм) ограничивает производительность процесса. Производительность возрастает с увеличением степени наполнения и более однородном заполнении сечения профиля стренгами. Уменьшить смещение стренг можно за счет снижения усилия и скорости пултрusion.

Профили удовлетворительного качества получены в области скорости пултрusion, близких к расчетным: 40–50 мм/с – для полиамида-6 и 15–20 мм/с – для полипропилена (табл. 2). Измеренные усилия также близки к вычисленным.

Условие консолидации выполняется в широком диапазоне скоростей, поэтому прочность при межслойном сдвиге практически равна прочности матричного полимера.

Вязкие свойства исследованных матричных полимеров существенно различны, поэтому сильно отличаются и оптимальные режимы пултрusion профилей. Следует отметить, что область оптимальных значений параметров процесса была предварительно найдена после многочисленных экспериментов [9]. Предложенная методика согласования основных стадий и оптимизации режимов процесса, несмотря на приближенность

Таблица 1. Характеристики свойств матричных полимеров

Полимер	ρ , г/см ³	α , мм ² /с	μ , Па с ⁿ	n	E , кДж/моль
Полиамид-6 (Гродно)	1,20	0,22	0,15	0,65	40
Полипропилен (каплен, ПТР 20 г/10мин)	0,92	0,12	0,45	0,56	40

Таблица 2. Режимы пултрusion и показатели свойств профилей

Матрица	Скорость, мм/с	Усилие, Н	Модуль упругости при изгибе, ГПа	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при сдвиге, МПа
Полиамид-6	40–50	80–160	10,5	220	28,0
Полипропилен	15–20	380–600	9,5	140	4,5

используемых соотношений, значительно облегчает поиск. Точность расчета зависит от точности задания исходных значений, показателей свойств компонентов и параметров установки.

Выводы

1. Разработаны теоретические основы определения оптимальных режимов пултрузии профилей из армированных термопластов при совмещенных в одной установке стадиях процесса – пропитке однонаправленного волокнистого наполнителя, консолидации стренг и формообразования изделия.

2. На основе анализа вязкого течения полимера на каждой стадии установлены границы области допустимых значений усилия и скорости протягивания при температуре пропитки, оптимальной для конкретного матричного полимера.

3. Найдены области оптимальных режимов пултрузии профилей из полиамида-6 и полипропилена, обеспечивающих максимальную производительность процесса.

4. Предложенный метод оптимизации может использоваться при разработке совмещенных технологических процессов пултрузии профилей из армированных термопластов.

Обозначения

a – коэффициент температуропроводности ленты; a_r – коэффициент температуропроводности стренги; A_f – площадь сечения ленты или профиля; b – ширина; b_c – ширина консолидируемого слоя; c^* – степень консолидации; d_a – диаметр пучка; h_0 – толщина пропитанного слоя; h_p – толщина прослойки полимерного расплава; E – энергия активации вязкого течения; k_r – коэффициент теплопроводности в радиальном направлении; K_e – эффективный коэффициент проницаемости волокнистого слоя; n, s – параметры вязкого течения; P_f – объемная доля волокон; P_m – объемная доля полимера; Q – масса изделия, формируемого в единицу времени; r – радиус стренги; R – универсальная газовая постоянная; R_c – радиус кривизны; R_f – радиус формообразующей поверхно-

сти; R_o – радиус кривизны отклоняющего элемента; T – термодинамическая температура; T_B – температура расплава на выходе из пропиточной головки; T_0 – температура окружающей среды; v – скорость протягивания) дает зависимость температуры от расстояния и от скорости перемещения стренги; v'_f – доля площади сечения, заполненная пучками; z – расстояние от пропиточной головки; α_0 – коэффициент теплоотдачи; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; $\Gamma(x)$ – гамма-функция; $\Delta y'$ – допуск на смещение стренг в сечении профиля; μ – коэффициент консистенции; μ_0 – константа в уравнении Аррениуса; ρ – плотность композита; ρ_a – плотность волокон; ρ_b – плотность полимера; τ – касательное напряжение; $\varphi_0, \varphi_c, \varphi_f$ – угол обхвата.

Литература

1. Gibson A. G. Continuous molding of thermoplastic composites / Comprehensive composite materials. Polymer matrix composites. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2 (2000)
2. Handbook of Composite Fabrication / Ed. G. Alkavali. Shawbury, Shrewsbury: Rapra Techn. Ltd (2001)
3. Ставров В. П. Механика и технология волокнистых композитов с термопластичной полимерной матрицей // Труды БГТУ, сер. 8, 8 (2000), 30–38
4. Stavrov V. P., Markov A. V., Zhernovskii A. V., Friedrich K. Effect of viscosity of a thermoplastic prepreg and matrix upon winding of rings // Mechanics of Composite Materials, 36 (2000), № 3, 249–254
5. Ставров В. П., Ставров В. В., Кременевская Е. И., Панкова Н. В. Пропитка натянутой системы полимерным расплавом // Материалы, технологии, инструменты, 4 (1999), № 1, 9–14
6. Карпович О. И., Ставров В. П. Оптимизация режимов соединения лент из армированных термопластов // Материалы, технологии, инструменты, 8 (2003), № 3, 94–98
7. Ставров В. П., Наркевич А. Л. Влияние структуры на жесткость и прочность пултрудируемых профилей из армированных термопластов // Zeszyty naukowe politechniki Bialostockiej. Nauki Techniczne. Mechanika, 24 (2001), № 13, 445–452
8. Ставров В. П., Зуев А. П., Марков А. В. Универсальная установка для изготовления методом пултрузии волокнистых композитов с термопластичной матрицей // Полимерные композиты 98. Гомель: ИММС НАНБ (1998)
9. Марков А. В., Наркевич А. Л., Карпович О. И., Ставров В. П. Режимы одностадийной пултрузии профилей из однонаправленно армированных термопластов // Труды БГТУ, сер. IV, 9 (2001), 130–134

Narkevich A. L., Stavrov V. P.

Optimization of pultrusion regimes of profiles from reinforced thermoplastics.

Conditions of optimizing pultrusion regimes of profiles made of reinforced thermoplastics have been studied for the case the stages of impregnation of fiber bunches with a polymer melt, strand curing and article molding are combined in one setup. The relations for acceptable temperature, velocity and load regimes have been derived from equations of the viscous-flow with account of the process features. The conditions for combining named stages and optimizing their parameters have been defined.

Поступила в редакцию 24.06.2003.

© А. Л. Наркевич, В. П. Ставров, 2003.