

УДК 678.073:678.027

СИЛОСКОРОСТНЫЕ РЕЖИМЫ ПРИКАТКИ РОЛИКОМ ОДНОНАПРАВЛЕННО АРМИРОВАННОГО ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО СЛОЯ

В. П. СТАВРОВ¹, В. М. ТКАЧЕВ², А. В. МАРКОВ¹¹ Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова 13а, 220630 г. Минск, Беларусь.² Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, пр. Октября 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.

На основе нелинейной (степенной) модели вязкого деформирования однонаправленного слоя при сжатии в трансверсальной плоскости установлены зависимости усилия прижатия ролика и сопротивления его перемещению от скорости перемещения и диаметра. Путем сравнения результатов расчета параметров процесса с найденными экспериментально в случае прикатки роликом однонаправленной ленты на основе полиэтилена высокого давления и стеклоровинга подтверждена адекватность предложенной модели процесса.

Введение

Прикатка роликом используется в процессах получения высокопрочных изделий из армированных термопластов наложением однонаправленного препрега на формообразующую матрицу [1, 2], намоткой на оправку [2], а также в процессах формообразования, совмещенных с пропиткой волокнистого наполнителя полимерным связующим [2–7]. При этом протекают два процесса: вязкое деформирование укладываемого слоя и фильтрация полимерного расплава через волокнистую систему. Если роликом прикатывается препрег (предварительно пропитанный полимером волокнистый слой), то фильтрация расплава не играет существенной роли.

Процесс прикатки термопластичного препрега роликом легко автоматизируется, однако для управления им требуются соотношения, позволяющие оптимизировать силоскоростные режимы с целью достижения требуемых показателей качества материала и производительности. Производительность процесса и качество изделия зависят от вязких свойств препрега, от усилия прижатия ролика и от скорости перемещения, определяющих, с одной стороны, толщину формируемого слоя, степень консолидации материала, а с другой, – сопротивление перемещению ролика. В известных работах [1–7] параметры процесса определяются на основе линейной модели вязкого течения препрега, которая, как показывают исследования [8], для армированных термопластов не вполне пригодна.

Цель данной работы – установить соотношения между силоскоростными режимами процесса и вязкими свойствами прикатываемого слоя, необходимые

для определения оптимальных параметров прикатки.

Модель процесса и расчет параметров

Схема прикатки однонаправленно армированного термопластичного слоя, находящегося в вязкотекучем состоянии, показана на рис. 1. Предполагается, что ролик 1 обкатывается без скольжения по ленте 2, прижимая ее к формообразующей поверхности 3. К ролику приложено усилие прижатия F_{Π} . В результате действия этого усилия в процессе перемещения ролика толщина слоя уменьшается от первоначальной h_0 до конечной h_k , при этом возникает сила сопротивления перемещению ролика, равная тянущей силе F_T , приложенной к ролику. Перемещениями материала в направлении движения ролика пренебрегаем, поскольку однонаправленно армированный препрег практически нерастяжим.

При обкатывании ролика без проскальзывания относительно формируемого слоя мгновенный

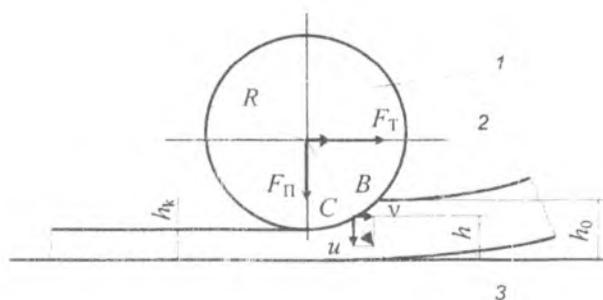


Рис. 1. Схема прикатки препрега роликом. 1 – ролик; 2 – лента препрега; 3 – формообразующая поверхность

центр скоростей находится в точке C (рис. 1). Скорость произвольной точки B , лежащей на поверхности ролика, имеет составляющую, направленную по нормали к формообразующей поверхности и равную

$$u = \frac{v}{R} \sqrt{2(h-h_k)R - (h-h_k)^2}, \quad (1)$$

где v – скорость перемещения ролика (скорость его оси); R – радиус ролика; h – толщина формируемого слоя в точке B .

К слою единичной длины (в направлении перемещения ролика), имеющему ширину b и толщину h , приложена сила F_{Π} . Пренебрегая кривизной, контактирующей со слоем поверхности ролика (что допустимо, если толщина слоя мала по сравнению с радиусом ролика), находим полную силу прижатия ролика

$$F_{\Pi} = \int_0^{z_0} F'_{\Pi}(z) dz, \quad (2)$$

где $z_0 = \sqrt{2(h_0 - h_k)R - (h_0 - h_k)^2}$ – длина контактирующего с роликом участка, отсчитываемая по оси z .

Сила F_{Π} является результирующей распределенных по ширине ролика сил (давления). Характер распределения давления зависит от условий на границе и от вязких свойств деформируемого слоя.

Распределенное по поверхности ролика давление определяет и силу сопротивления перемещению ролика. Эта сила находится в результате интегрирования проекции давления на ось z по всей поверхности ролика, контактирующей с деформируемым слоем

$$F_T = \int_0^{z_0} \int_{-b/2}^{b/2} p(x) \frac{z}{R} dx dz, \quad (3)$$

где x – координата, отсчитываемая в направлении ширины ролика (или прикатываемой ленты).

При расчете силы сопротивления по формуле (3) предполагается, что прилипание имеет место только на участке деформирования слоя длиной z_0 . После прохождения роликом точки C прилипание отсутствует. В реальных процессах выполнение этого условия обеспечивается соответствующим подбором материала ролика и температуры его поверхности.

Таким образом, для определения сил прижатия ролика и сопротивления его перемещению при заданных свойствах деформируемого слоя, его начальной и конечной толщинах и заданной скорости перемещения ролика необходимо знать распределение давления на контактной поверхности единичной длины. Это распределение аналогично распределению давления при сжатии однонаправленного (трансверсально изотропного) слоя между

плоскопараллельными плитами.

Примем для описания вязких свойств однонаправленно армированного термопластичного слоя, деформируемого в трансверсальной плоскости, степенной закон течения в виде

$$\tau = k \dot{\gamma}^n, \quad (4)$$

где τ – касательные напряжения; k – коэффициент вязкости; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; n – показатель степени.

На основании решения задачи о сжатии вязкого однонаправленно армированного слоя со степенным законом течения (4) между плоскопараллельными плитами [8, 9] для давления на поверхности ролика и силы прижатия, отнесенной к единице длины слоя, имеем:

$$p(x) = \frac{k(s+2)^n v^n A^{(n+1)}}{(n+1)h^{3(n+2)}} \left[1 - \left(\frac{2x}{b} \right)^{(n+1)} \right]; \quad (5)$$

$$F'_{\Pi}(h) = \frac{k(s+2)^n v^n A^{(n+2)}}{(n+2)h^{3(n+1)}}, \quad (6)$$

где $A = b_0 h_0$ – площадь поперечного сечения слоя (b_0 – начальная ширина слоя); u – скорость сжатия слоя, связанная со скоростью перемещения ролика соотношением: $u = vz/R$.

Подставив соотношения (5) и (6) в (2) и (3), запишем в общем виде выражения для усилия прижатия и силы сопротивления перемещению ролика:

$$F_{\Pi} = DR \int_{z_0}^{h_k} \frac{z^n(h)}{h^{3(n-1)}} dh; \quad (7)$$

$$F_T = D \int_{h_0}^{h_k} \frac{z^{(n+1)}(h)}{h^{3(n+1)}} dh, \quad (8)$$

$$\text{где } D = \frac{k(s+2)^n A^{(n+2)} v^n}{(n+2)R^n}. \quad (9)$$

Выражения интегралов, заданных формулами (7) и (8), получаются громоздкими, поэтому дальнейшие расчеты выполнены численно.

Зависимость конечной толщины прикатываемого слоя h_k – важнейшего параметра, характеризующего качество получаемого изделия, а именно степень консолидации слоев, от усилия прижатия и скорости ролика в явном виде из формул (7) и (8) не следует. Решение трансцендентного уравнения (7) относительно h_k дает возможность проанализировать зависимость этого параметра от усилия прижатия и радиуса ролика, от вязких свойств слоя и других параметров процесса (рис. 2)

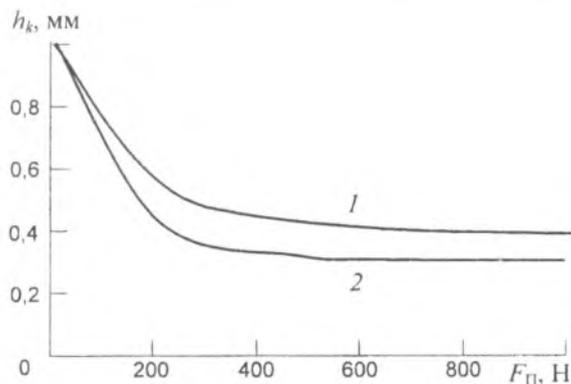


Рис. 2. Зависимость толщины формируемого слоя от усилия прижатия ролика при различной скорости укладки: 1 – 2; 2 – 10 см/с (Диаметр ролика – 25 мм)

При формировании слоя заданной толщины h_x требуемое усилие прижатия является линейной функцией коэффициента вязкости и степенной функцией скорости перемещения ролика, показатель степени которой равен n показателю степени в законе вязкого течения деформируемого слоя (4). В случае линейно вязкого слоя эта зависимость также линейная.

На усилие прижатия ролика, необходимое для достижения заданной толщины слоя, радиус ролика не оказывает существенного влияния. Так, с увеличением радиуса ролика в 5 раз (с 10 до 50 мм) усилие прижатия возрастает только на 25%. Сила сопротивления перемещению ролика при этом уменьшается почти в 2 раза.

Методика и результаты эксперимента

Экспериментальную проверку адекватности полученных соотношений, связывающих силоскоростные режимы процесса с характеристиками слоя и радиусом ролика, проводили на установке, схема которой показана на рис. 3.

Ленту однонаправленно армированного препрега помещали на нагреваемую плиту и прокатывали роликом. Диаметр ролика принимали равным 16, 25 и 50 мм. Привод обеспечивал задание различных скоростей перемещения ролика в диапазоне от 1 до 10 см/с. Различные значения усилия

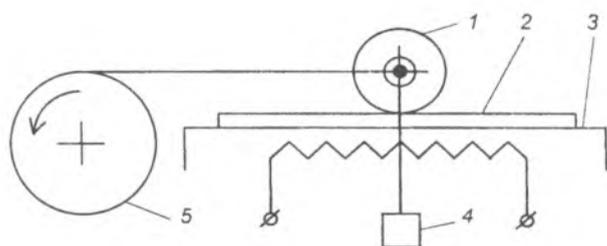


Рис. 3. Схема установки для изучения силоскоростных режимов прикатки препрега роликом: 1 – ролик; 2 – препрег; 3 – нагреваемая плита; 4 – груз; 5 – привод с измерителем тянущего усилия

прижатия ролика задавали грузами, размещаемыми на опорах с подшипниками. Усилие сопротивления перемещению ролика измеряли с помощью тензометрической силоизмерительной системы. Толщину формируемого слоя измеряли непосредственно в процессе прикатки (с помощью преобразователя перемещения) и после охлаждения слоя.

В экспериментах использовали ленту препрега на основе полиэтилена высокого давления марки 15803-020 и стекловолокна РБТ13-2400, полученную на универсальной пултрusionной установке [10]. Содержание стекловолокна 17 об.%. Размеры поперечного сечения ленты 10×2 мм.

Характеристики вязких свойств препрега определяли по методу сжатия слоя между плоскопараллельными плитами [8] при температуре 140 °С, равной температуре в экспериментах по прикатке слоя. Обоснованность выбора закона течения однонаправленно армированного препрега при сжатии в трансверсальной плоскости в форме выражения (4) проверяли по зависимостям между логарифмами скорости сжатия и толщиной образца, а также между касательными напряжениями и скоростями сдвига в логарифмических координатах. Коэффициент корреляции между соответствующими величинами, как правило, не менее 0,99. Это дает основание констатировать удовлетворительное соответствие наблюдаемых зависимостей принятому закону течения. В результате обработки полученной в эксперименте временной зависимости толщины сжимаемого слоя по методике, описанной в работе [8], определены параметры степенного закона течения (4) для препрега: $k = 14 \text{ кПа}\cdot\text{с}^n$, $n = 0,72$.

Экспериментально зафиксированные значения усилий сопротивления перемещению роликов различного диаметра при разных значениях сил прижатия ролика оказались достаточно близкими к рассчитанным по формулам (7) и (8) (рис. 4). Удов-

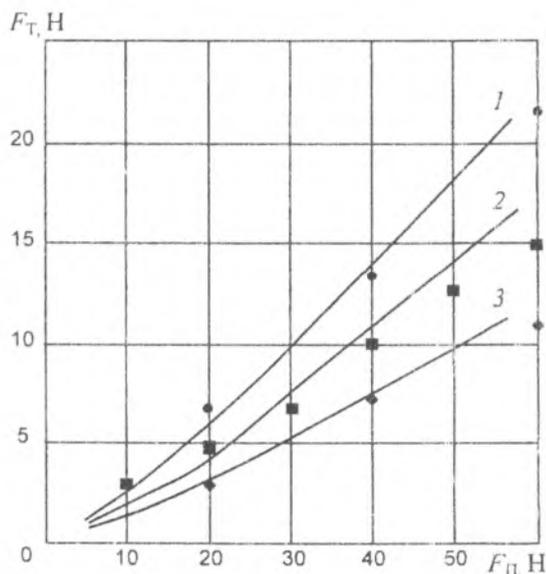


Рис. 4. Зависимость тянущей силы от усилия прижатия ролика различного диаметра: 1 – 16; 2 – 25; 3 – 50 мм

летворительное совпадение получено и для значений толщины прикатанного слоя. Отклонения вполне укладываются в границы допускаемых погрешностей измерения. Таким образом, подтверждена адекватность предложенной модели процесса.

Выводы

Для установления силоскоростных режимов процесса прикатки роликом однонаправленно армированного термопластичного слоя целесообразно использовать соотношения, полученные на основе модели вязкого деформирования слоя со степенным законом течения и экспериментально определяемые параметры этого закона.

Обозначения

A – площадь поперечного сечения слоя; b_0 – начальная, b – текущая ширина слоя, h_0 – первоначальная, h_k – конечная, h – текущая толщина слоя; F_{Π} – усилие прижатия; F_T – тянущая сила; k – коэффициент вязкости; n – показатель степени; R – радиус ролика; u – скорость сжатия слоя; v – скорость перемещения ролика; x, z – координаты; z_0 – длина контакта; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; τ – касательное напряжение.

Литература

1. Gutowski T. G., Bonhome L. The mechanics of prepreg conformance // *J. Composite Materials*, 22 (1987), N 3, 204–223
2. Lin H. H., Ranganathan S., Advani S. G. Consideration of continuous-fiber system // *Flow and rheology in polymer composites manufacturing*. Amsterdam Elsevier (1994), 325–360
3. Mantell S. C., Springer G. S. Manufacturing process models for thermoplastic composites // *J. Composite Materials*, 26 (1992), N 16, 2348–2377
4. Hauptert F. *Thermoplast-Wickeltechnik/* Duesseldorf: VDI-Verlag (1997)
5. Lauke B., Friedrich K. Evaluation of processing parameters of thermoplastic composites fabricated by filament winding // *Composites Manufacturing*, 4 (1993), N 2, 93–101
6. Павловский Д. В., Головкин Г. С., Зеленский Э. С., Кунерман А. М. Исследование термопластичных композиционных материалов, полученных по волоконной технологии намоткой // *Сб. труд. науч.-техн. конфер. «Полимерные композиты-98»*, Гомель (1998), 116–118
7. Lin H.-R., Advani S. G. Processing models of thermoplastic composite wound parts // *Polymer composites*, 18 (1997), № 3, 405–411
8. Ставров В. П., Дорожко А. В., Зуев А. П. и др. Характеристики анизотропных волокнистых композитов с термопластичной матрицей в вязкотекучем состоянии. 1. Методы определения // *Материалы, технологии, инструменты*, 3 (1998), № 3, 92–97
9. Wang E. L., Gutowski T. G. Laps and gaps in thermoplastic composites process // *Composites Manufacturing*, 2 (1991), № 2, 69–78
10. Ставров В. П., Зуев А. П., Марков А. В. Универсальная установка для изготовления методом пултрязи волокнистых композитов с термопластичной матрицей // *Тез. докл. науч.-техн. конфер. «Полимерные композиты-98»*, Гомель (1998), 184

Stavrov V. P., Tkachev V. M., Markov A. V.

Force-speed relations for rolling-on unidirectional reinforced thermoplastic layer.

The dependence of pressing force and resistance to movement on speed and diameter of roller has been determined based on a nonlinear model (power law flow) of viscous squeeze of unidirectional layer in transversal section. The adequacy of proposed model is established by comparison of calculated and experimental values for glassroving/HD-polyethylene tape laying.

Поступила в редакцию 26.10.99.

© В. П. Ставров, В. М. Ткачев, А. В. Марков, 2000.