

УДК 678.073:678.029.43:539.4

КРИТЕРИЙ ПРОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЛЕНТ ИЗ АРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

Ставров В. П., Карпович О. И.

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

Введение. Современные технологии совмещения термопластичных матричных полимеров с волокнистыми армирующими наполнителями позволяют изготавливать высокопрочные ленты. Изделия с заданной системой армирования получают в результате консолидации (сплавления) лент непосредственно в процессе формообразований изделий методами пултрузии, укладки и намотки [1-5]. Установлено [2, 5], что определяющую роль в процессах сплавления лент играет вязкое течение матричного полимера. Предложен ряд моделей процесса консолидации. Согласно деформационной, или модели близкого контакта (*intimate contact model*), степень консолидации определяется деформаций неровностей соединяемых поверхностей. В диффузионной модели, или модели "залечивания" (*healing model*), ответственной за формирование связи считается самодиффузия макромолекул. Относительная глубина затекания полимерного расплава в шероховатый поверхностный слой ленты как параметр, характеризующий степень консолидации, вводится в перколяционной модели [6, 7]. Независимо от механизма, определяющего процесс формирования связи, показателем степени консолидации может служить отношение прочности соединения лент к прочности матричного полимера. Прочность соединения лент по аналогии с прочностью клеевых соединений оценивают по разрушающему усилию (или среднему значению касательного напряжения) при продольном сдвиге [1, 4, 6] или по усилию отрыва ленты [7, 8]. Связь между режимами консолидации и условиями разрушения лент исследована недостаточно. При оценке степени консолидации не учитываются особенности структуры промежуточного слоя, обуславливающие характер его деформирования и разрушения. В данной работе вводится обобщенный критерий, определяющий влияние параметров процесса консолидации и вязких свойств матричного полимера на прочность соединения лент из армированных термопластов при различных, в т.ч. неизотермических, режимах, и устанавливается связь показателей прочности соединения лент с показателями прочности матричного полимера.

Модель консолидации. Соединение лент происходит под действием давления p_0 , приложенного к лентам, при условии, что матричный полимер при температуре T находится в вязкотекучем состоянии. Температура поверхностного слоя T , давление p_0 и продолжительность его воздействия t являются основными параметрами процесса, определяющими прочность связи лент.

Предположим, что течение расплава матричного полимера подчиняется степенному закону $\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}^n$ (τ – касательные напряжения; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; μ – коэффициент консистенции; n – параметр) и примем зависимость коэффициента консистенции μ от термодинамической температуры T в форме закона Аррениуса:

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot \exp\left(\frac{E_m}{RT}\right). \quad (1)$$

Здесь μ_0 – константа; E_m – энергия активации вязкого течения; R – универсальная газовая постоянная.

При неізотермическом режиме консолидации температура является функцией времени t , следовательно, $\mu = \mu(T, t)$. В общем случае параметр n также является функцией температуры и времени. Рассматривая вязкость матричного полимера в качестве одного из независимых параметров процесса, образуем безразмерный комплекс из основных величин, влияющих на прочность связи лент при нестационарном, в частности неізотермическом, режиме сплавления:

$$K_c = \int_0^{t_c} \left(\frac{P_0(t)}{\mu(T, t)} \right)^s dt. \quad (2)$$

Здесь и далее обозначено $s = 1/n$.

В качестве критерия достижения прочной связи примем $K_c \geq K_c^*$, где K_c^* – значение комплекса K_c , при котором прочность связи между лентами составляет не менее заданной доли c от предельно достижимой, например от когезионной прочности матричного полимера. По физическому смыслу величина c в зависимости от режимов процесса может принимать значения в диапазоне от 0 до 1. Ее конкретное значение зависит от выбора модели процесса и показателя степени консолидации в этой модели.

Для задания комбинации режимов процесса консолидации лент, при которых достигается достаточная прочность связи, необходимо знать зависимости $c = f(K_c)$ или $K_c = f(c)$. Обе эти зависимости могут быть рассчитаны на основе моделей процесса консолидации. Запишем их для перколяционной модели консолидации.

Если профиль поверхности ленты задан нормальным случайным полем ζ с нормированной нормальной функцией распределения ординаты $F_\zeta(u)$, то зависимость между комплексом K_c и относительной глубиной затекания c (степенью консолидации) записывается в виде [7]:

$$K_c(c) = C \int_0^{3c} F_\zeta^{1+2s}(u) [1 - F_\zeta(u)]^{-1} (u)^s du, \quad (3)$$

где C – константа, учитывающая особенности геометрии поверхности.

Другая, более простая (детерминистическая) интерпретация перколяционной модели следует из предположения, что профиль ленты задан периодической функцией $y = 0,5 h_0 \sin(2\pi x/Sm)$, где h_0 – высота, Sm – шаг неровностей профиля. Тогда ширина впадины на произвольном уровне y (при затекании расплава на глубину y') равна $b'(u) = 0,5 Sm (1 + 2\pi^{-1} \arcsin(1 - u))$, где $u = 2y'/h_0$. Расход нелинейно-вязкой жидкости, затекающей в щель единичной длины и шириной b' под давлением p_0 на входе, равен (см., например, [9]):

$$q_1 = b' \frac{dy'}{dt} = \frac{b'^{s+2}}{(s+2)2^{s+1}} \left(\frac{p_0}{y' \mu} \right)^s. \quad (4)$$

Примем в качестве степени консолидации относительную глубину затекания $c = y'/h_0$. Подставив в формулу (4) выражение $b'(u)$ и проинтегрировав, получим следующую зависимость между параметром ε и степенью консолидации c :

$$K_c(c) = (s + 2)h_0^{s+1} \int_0^c b^{-1-s}(u)u^s du \quad (5)$$

В отличие от деформационной и диффузионной моделей процесса консолидации лент, перколяционная модель не содержит формальных ограничений на значения K_c , поэтому значения комплекса K_c^* зависят только от заданного значения достаточной степени консолидации $c = c^*$. В качестве достаточной степени консолидации может быть принято число, близкое к 1, например $c^* = 1 - \Delta c$, где Δc – абсолютная погрешность экспериментальной оценки значений c .

Условия разрушения связи. Рассмотрим две наиболее распространенные схемы испытаний соединений лент на прочность (рис. 1).

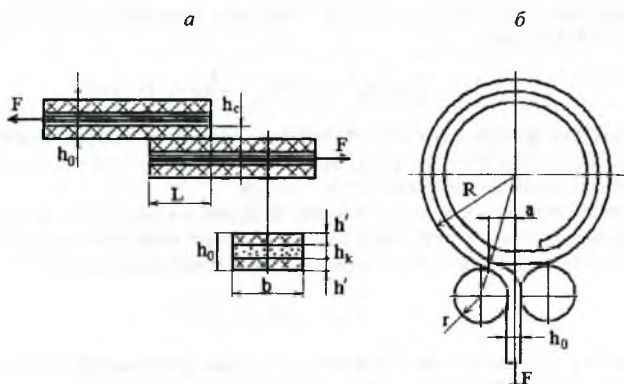


Рис. 1. Схемы испытания соединений лент на прочность при продольном сдвиге (а) и при отрыве от кольца (б).

При испытаниях на продольный сдвиг (см. рис. 1, а) напряженное состояние в зоне соединения аналогично напряженному состоянию в клеевой прослойке (см., например, [9]). Функцию прослойки выполняет двослойный наружный слой ленты толщиной $h_k = 2 h''$. Толщина этого слоя h'' зависит от технологии формирования ленты. При пултрузионной пропитке слоя волокон расплавом полимера она зависит от толщины и натяжения этого слоя волокон и от вязкости расплава [5]. С учетом этих факторов касательные напряжения в прослойке запишем в виде [10]:

$$\tau(z) = F \cdot k \cdot \left(\frac{\cosh(k(z - L)) + \cosh(kz)}{2 \cdot \sinh(kL)} \right) \quad (6)$$

Здесь

$$k = \sqrt{\frac{G_c G_k}{G_c h_k + G_k h_c} \cdot \frac{2}{E_k h_k}}; E_k = E_a P_a + E_c P_c; G_k = G_a P_a + G_c P_c;$$

E_a, E_c, G_a, G_c – модули Юнга и модули сдвига армирующего наполнителя и матричного полимера соответственно; P_a и P_c – их объемные доли в армированном слое толщиной h_k ; другие обозначения – на рис. 1.

Из формулы (6) следует типичное для клеевых соединений распределение касательных напряжений с максимальными значениями на краях. Условием начала разрушения служит достижение этими напряжениями предельных значений для матричного полимера в прослойке. Среднее значение касательных напряжений в прослойке $\bar{\tau}$ при достижении предельной нагрузки F^* получим, проинтегрировав (6) по длине соединения L и разделив на L .

Испытания на отрыв ленты от кольца по схеме, изображенной на рис. 1, б, аналогичны определению межслойной вязкости разрушения путем расслоения с изгибом полосы [8, 11], однако в рассматриваемом случае отслоившийся участок ленты опирается на ролик, поэтому его деформация ограничена. Оценим часть усилия, связанную с деформированием ленты, по кривизне ролика $1/r$ и жесткости ленты при изгибе. С учетом неоднородной структуры материала в поперечном сечении ленты (см. рис. 1, а) жесткость при изгибе равна

$$D_x = [E_z h_k^3 + E_c (h_o^3 - h_k^3)] \cdot b / 12.$$

Изгибающий момент равен $M_x = D_x / r$. Плечо силы F из условий опирания кольца (см. рис. 1, б): $a \approx R_o r / (R_o + r)$. Тогда эффективное усилие, под действием которого происходит отслоение ленты, равно $F_{yo}^* = F - M_x / a$.

Усилие F^* , отнесенное к ширины ленты, практически совпадает с интенсивностью высвобождения энергии в результате разрушения (удельной работой разрушения) [8, 10, 11]. Вязкость разрушения рассчитывается по известной формуле [11]:

$$K_{Ic} = \sqrt{E_c F_{yo}^* b^{-1}}. \quad (7)$$

Поскольку при идеальной связи между лентами разрушение происходит путем разрыва прослойки матричного полимера, то степень консолидации целесообразно оценивать, сравнивая вязкость разрушения, найденную по результатам испытаний на отрыв ленты (рассчитанную по формуле (7)), с вязкостью разрушения матричного полимера, получаемой при испытаниях на растяжение плоских образцов с разрезом.

Методика эксперимента. Однонаправленно армированные ленты шириной 10 ± 1 мм получали в результате пултрузионной пропитки стеклоровинга РБТ 13-2400 и РБО24-2400 (30–40 мас. %) расплавами полипропилена (ПП) каплен с показателем текучести расплава 20 г/10 мин при 230 °С.

Параметры закона течения полимерного расплава и уравнения Аррениуса (1) – μ_0, E_m, n – определяли по методу деформирования дисков между плоскопараллельными плитами [9]. Модуль упругости, разрушающее напряжение ПП при растяжении определяли по стандартным методикам на образцах шириной 10 мм и толщиной 5 мм, вырезанных из плит, отформованных в вязкотекучем состоянии. Вязкость разрушения находили, испытывая такие же образцы, но с боковыми разрезами глубиной l , равной 0,3 от ширины образца, и вычисляя искомую величину по формуле:

$$K_{Ic} = 1,66 \cdot \sigma_p \cdot \sqrt{\pi l}. \quad (8)$$

Здесь коэффициент 1,66 учитывает относительную ширину разреза [11].

Ленты соединяли внахлестку по схеме на рис. 1, а на участке длиной 5, 10 и 15 мм, выдерживая при постоянной температуре в течение заданного промежутка времени t .

Варьировали температуру, давление и продолжительность выдержки. Прочность соединения лент оценивали по среднему напряжению межслойного сдвига $\bar{\tau}$, соответствующему разрушающему усилию. Степень консолидации c определяли как отношение $\bar{\tau}$ к значению прочности, соответствующему максимально достижимой прочности связи, для которой $c^* = 1$. Строили зависимости $c = f(K_c)$, вытекающие из формул (2), (3) и (5). Вычисляли характеристики отклонения экспериментальных значений степени консолидации c от вычисленных согласно указанным уравнениям. С учетом погрешности оценки степени консолидации находили значения K_c , соответствующие достаточной прочности соединения лент.

Адекватность критерия прочности соединения лент (2) при неизотермическом режиме сплавления проверяли, испытывая кольца по схеме на рис. 1, б. Кольца получали, соединяя однонаправленно армированные ленты на основе стеклорвинга и ПП по схеме, показанной на рис. 2, в процессе намотки на ПП-трубу диаметром 110 мм с помощью высокоэнергетических источников – CO₂-лазера и газовой горелки. Мощность лазерного излучения на площадке контакта 450 Вт. Расстояние до точки контакта 250 мм. Мощность потока пламени газовой горелки задавали равными 160 и 300 Вт, расстояние до точки контакта 10 мм. Натяжение ленты 45 Н, число слоев 2–3. Варьировали скорость намотки от 35 до 197 мм/с, усилие прижатия консолидирующим роликом от 25 до 70 Н. ИК-термометром измеряли температуру в зоне нагрева. Испытания на отрыв проводили по схеме на рис. 1, б. Радиус ролика $r = 10$ мм, скорость перемещения активного захвата 10 мм/мин. Регистрировали значения усилия отрыва ленты F на участке, соответствующем одному обороту кольца, всего записывали 36 значений в каждом опыте. Находили среднее значение усилия, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации. По среднему значению усилия отрыва, откорректированному с учетом жесткости ленты при изгибе, используя зависимость (7), рассчитывали коэффициенты вязкости разрушения.

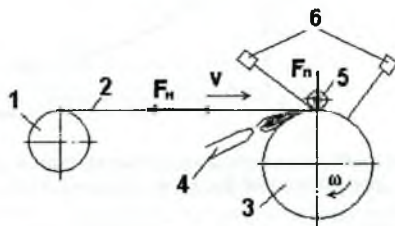


Рис. 2. Схема намотки ленты: 1 – бобина с лентой; 2 – лента; 3 – оправка; 4 – источник излучения (газовая горелка или CO₂-лазер); 5 – прижимной ролик; 6 – термометр.

Комплекс K_c (см. формулу (2)), определяющий прочность соединения лент в неизотермическом режиме, рассчитывали с учетом варьируемых в эксперименте параметров. Переменную t в формуле (2) заменяли на координату $z = vt$ (v – скорость намотки ленты), отсчитываемую от начальной точки контакта приплавляемой ленты по окружности оправки. При каждом режиме находили распределение температуры на поверхности ленты и давление консолидирующего ролика.

Коэффициент консистенции расплава матричного полимера как функцию температуры находили по формуле (1), при этом температуру поверхностного слоя, переменную по координатам и времени вычисляли по приближенным формулам [9]. Учитывали также температурную зависимость показателя степени n в законе течения как ли-

нейную функцию обратной термодинамической температуры. Давление, создаваемое консолидирующим роликом, оценивали с учетом вязких свойств ленты согласно формулам, приведенным в работах [5, 7]. Степень консолидации, найденную по рассчитаным таким образом значениям критерия K_c , сравнивали с полученной в результате эксперимента относительной прочностью соединения лент.

Результаты эксперимента и их обсуждение. В результате испытаний получены следующие значения показателей свойств матричного полимера, определяющих прочность соединения лент: $\mu_0 = 0,45$ Па сⁿ; $E_m = 35$ кДж; $n = 0,25$ при 160 °С и $n = 0,56$ при 300 °С; $E_c = 1,6$ ГПа; $\sigma_p = 37,4$ МПа. Характеристики упругих свойств стеклянных волокон, входящие в расчетные соотношения, принимали по справочным данным.

По результатам испытаний на растяжение образцов с разрезом вязкость разрушения ПП, рассчитанная по формуле (8), равна 3,4 МПа м^{0,5}, коэффициент вариации 2%.

Средние значения касательных напряжений в момент разрушения соединений, полученных в изотермическом режиме сплавления лент, рассчитанные с учетом формулы (6) и при разрушающем напряжении $\tau_p = 32$ МПа ($\tau_p = 0,87 \sigma_p$), сравнивали с экспериментальными данными (рис. 3). Удовлетворительное соответствие свидетельствует об адекватности расчетной схемы. Согласно расчетам, эффективная длина соединения, т.е. такая, что дальнейшее увеличение длины соединения нецелесообразно по условиям прочности, равна 16 мм. В экспериментах при длине соединений больше 15 мм наблюдали разрушение в результате разрыва армирующих волокон.

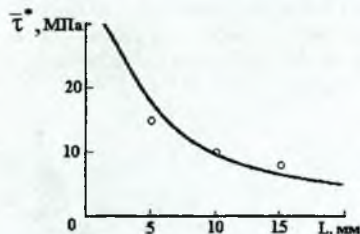


Рис. 3. Зависимость среднего значения касательного напряжения в ленте при разрушающей нагрузке от длины соединения.

Разность между относительной прочностью соединения при межслойном сдвиге, найденной эксперименте, и относительной глубиной затекания полимера, рассчитанной по формулам (3) и (5) для различных значений безразмерного комплекса $K_c(c)$, рассчитанных по формуле (2) с учетом заданных в эксперименте параметров процесса консолидации, невелика (рис. 4).

При $C = 60$ коэффициент корреляции между вычисленными по формуле (2) и экспериментальными значениями степени консолидации более 0,95. Среднее квадратическое отклонение экспериментальных значений от расчетных $v_c \leq 0,15$. Условие достижения достаточной прочности соединения c^* получим из уравнения $1 - \Delta c = K_c (c^*)$.

С учетом разброса показателей степени консолидации возможные отклонения среднего значения относительной прочности соединения от расчетного с вероятностью 0,95 составляют $\Delta c \cong 0,08$. Из результатов испытаний, показанных на рис. 4, следует, что указанный уровень прочности связи достигается при $K_c \geq 3,8 \cdot 10^4$.

Зависимость, полученная при неизотермических режимах консолидации, показана на рис. 5. В качестве степени консолидации принято отношение среднего усилия отрыва ленты к максимальному.

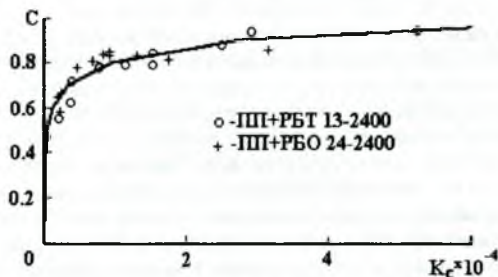


Рис. 4. Зависимость степени консолидации лент от безразмерного комплекса параметров процесса изотермического сплавления.

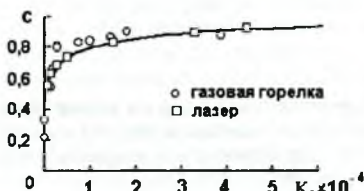


Рис.5. Зависимость степени консолидации лент ПП+РБО 24-2400 от безразмерного комплекса параметров процесса намотки.

Среднее квадратическое отклонение усилия отрыва лент составляет 1,1–1,5 кН/м, коэффициент вариации 10–14%. Усилие отрыва ленты, отнесенное к единице ширины ленты, практически совпадает с удельной работой разрушения связи между лентами. Максимальное значение данной величины, достигнутое при полном сплавлении лент, равно $F_{y0}^* = 11,5$ кДж/м². Следует заметить, что данное значение удельной работы разрушения связи между лентами в 5 раз больше указанных в статье [8], правда, для иного (терморезактивного) матричного полимера.

Максимальные значения коэффициентов вязкости разрушения связи между лентами, рассчитанные по удельной работе разрушения согласно формуле (7), оказались даже несколько больше значений, полученных при испытаниях на растяжение образцов матричного полимера с разрезом (4,2 и 3,4 МПа м^{0,5} соответственно). Различие вполне объяснимо неполным соответствием напряженного и деформированного состояния в зоне распространения трещины для этих двух случаев испытаний, а также различиями структуры и механических свойств матричного полимера и армированной ленты.

Зависимость, показанная на рис. 5, свидетельствует об удовлетворительном соответствии расчетных и экспериментальных значений показателя степени консолидации. Среднее квадратическое отклонение экспериментальных значений степени консолидации от расчетных составляет менее 7%. Установлено также, что степень консоли-

дации практически линейно зависит от логарифма функции $K_c(c)$, т.е. от значения интеграла в правой части уравнения (2), содержащего все основные параметры процесса консолидации. Коэффициент корреляции между этими величинами равен 0,85, что свидетельствует о достаточно тесной статистической зависимости.

С учетом разброса показателей степени консолидации (коэффициент вариации $v_c = 0,10-0,14$) возможные отклонения среднего значения от теоретического при уровне значимости 0,05 составляют $\Delta c = v_c / 3$. Следовательно, значения $c \geq 0,95$ могут быть приняты в качестве критерия достижения прочной связи между лентами, обеспечивающего прочность соединения практически равную когезионной прочности матричного полимера. Как следует из результатов эксперимента, для этого должно выполняться условие $K_c \geq 4,3 \cdot 10^4$. Значение минимально допустимого значения критерия K_c , полученное в эксперименте для неизотермического режима консолидации, отличается от значения, полученного при изотермическом режиме на 25%. Но если учесть, что при $c > 0,9$ угол наклона кривой $c = f(K_c)$ становится малым и различие значений c на 0,03 не превышает погрешности оценки этой величины, то можно сделать вывод об универсальности критерия прочности.

Предлагаемые критерий и методика оценки прочности соединения лент из армированных термопластов могут быть использованы для оптимизации режимов сплавления лент.

Список литературы

1. Головкин Г.С., Павловский Д.В. Производство и переработка непрерывно армированных термопластов намоткой // Пластические массы, №3, 1997, с. 42–48.
2. Gibson A.G. Continuous molding of thermoplastic composites/ Comprehensive composite materials, Vol. 2. – Oxford: Elsevier, 2000, pp. 979–998.
3. Christen O., Beresheim G., Neitzel M., Rasche C. Thermoplastwickeln mit Direktimpregnerung: Kostengünstigen Herstellung von Druckbehältern // Kunststoffe, Vol. 89, № 4, 1999, S. 79–81.
4. Shao Cong Dai, Lin Ye. Characteristics of CF/PEI tape winding process with on-line consolidation // Composites: Part A 33, 2002, pp. 1227–1238.
5. Narkevich A.L., Stavrov V.P., Friedrich K. The flexible producing of high-strength articles from fibre reinforced thermoplastics. – Proc. Int. Conf. Comp03, Corfu, 2003.
6. Ставров В.П., Карпович О.И., Свириденко А.И. Перколяционная модель консолидации слоев армированных термопластов // Доклады НАН Беларуси, т. 47, № 5, 2003, с. 112–114.
7. Карпович О.И., Ставров В.П. Оптимизация режимов соединения лент из армированных термопластов // Материалы, технологии, инструменты, т. 8, № 3, 2003, с. 94–98.
8. Solodilov V.I. a.a. Determination of the interlaminar fracture toughness of glass-fiber-reinforced plastics on ring segments/Mechanics of Composite Materials, Vol. 39, No. 5, 2003, pp. 407–414.
9. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия 1984. – 628 с.
10. Композиционные материалы: Справочник/ Под ред. В.В.Васильева и Ю.М.Тарнопольского – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
11. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.