

678
К 26

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 678.073:678.027.9

Карпович Олег Иосифович

**КОНСОЛИДАЦИЯ АРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ
ПРИ ФОРМОБРАЗОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ**

05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 2004

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» на кафедре сопротивления материалов

Научный руководитель

доктор технических наук,
профессор Ставров В.П.,
УО «Белорусский государственный
технологический университет»

Официальные оппоненты

доктор технических наук,
профессор Струк В.А.,
УО «Гродненский государственный
университет им. Я. Купаль»;

доктор технических наук,
профессор Довгяло В.А.
УО «Белорусский государственный
университет транспорта»

Опонирующая организация

Государственное научное
учреждение «Институт механики
металлополимерных систем
им. В.А. Белого» НАН Беларуси

Защита состоится «28» декабря 2004 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.04 в УО «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, зал заседаний ученого совета, ауд. 240, корпус 4.
тел./факс.: (8-017) 227-51-71; e-mail: kalya@bstu.unibel.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УО «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «25» ноября 2004 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук



О.Я. Толчак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Термопласты, армированные волокнами, благодаря экономическим и экологическим преимуществам перед композитами с термореактивной матрицей имеют широкие перспективы использования в качестве конструкционных материалов в различных отраслях техники. Высокопрочные изделия из армированных термопластов получают методами укладки лент и намотки, пултрузии и прессования в вязкотекучем состоянии. Формообразование изделий и консолидация материала (деформирование и соединение лент препрега или стренг, приводящие к получению плотной и прочной структуры композита) происходят одновременно. Производительность процессов формообразования ограничивается прежде всего условиями нагрева, необходимого для обеспечения вязкого течения матричного полимера и взаимной диффузии молекул. Интенсивный нагрев затрудняет управление процессом формообразования и неизбежно ведет к термоокислительной деструкции полимера. Взаимная зависимость явлений различной природы, происходящих на стадии консолидации, существенно усложняет их исследование и описание. Известные закономерности сварки термопластов и уплотнения волокнистых композитов в вязкотекучем состоянии оказываются не вполне пригодными для управления процессом консолидации. В последние годы в связи с разработкой промышленных технологий производства изделий из армированных термопластов явления, протекающие при формообразовании, а также специфические особенности процессов укладки лент, намотки, пултрузии и прессования стали предметом тщательного изучения. Однако, несмотря на повышенный интерес исследователей к данной проблеме, отсутствует адекватная модель консолидации армированных термопластов при формообразовании изделий, обеспечивающая оптимизацию параметров, прежде всего по критериям производительности и минимума энергозатрат. Это сдерживает промышленное освоение перспективных технологий получения высокопрочных изделий из армированных термопластов.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Исследования проводились в рамках госбюджетной темы “Теоретические основы процессов формообразования изделий из термопластичных полимеров, армированных длинными волокнами” (№ ГР 2000930, 2000–2001 гг.), финансируемой Министерством образования Республики Беларусь, задания 4.13 ГПОФИ “Материал” (этап “Моделирование процесса консолидации однонаправленно армированных термопластичных лент при формовании слоистых структур”, 2004 г.) и задания 3.11 ГНТП “Ресурсосбережение” “Исследовать технологический процесс получения армированных труб из термопластичных, в т.ч. вторичных материалов, производимых в Беларуси, и выдать рекомендации для их промышленного производства”, 2004 г.

640ар



Цели и задачи исследований. Цель работы – повышение производительности и управление параметрами консолидации термопластов, армированных непрерывными волокнами, при формообразовании изделий.

Для достижения этой цели поставлены следующие основные задачи:

1. Изучить влияние нелинейно-вязких свойств матричных полимеров и однонаправленно армированных стренг и лент, а также технологических параметров на кинетику и степень консолидации материала.
2. Разработать адекватные модели консолидации, учитывающие нелинейность, температурную зависимость вязких свойств и термоокислительную деструкцию матричных термопластичных полимеров.
3. Разработать критерии оптимизации технологических режимов и методы управления процессом консолидации, обеспечивающие высокую прочность соединения лент и производительность формообразования изделий при минимальных энергозатратах.

Объект и предмет исследования. Объект исследования – технологические процессы прессования, укладки и намотки лент из термопластов, армированных непрерывными волокнами, и явления, протекающие при консолидации материала в данных процессах. Предмет исследования – параметры технологических процессов консолидации армированных термопластов при формообразовании изделий и характеристики материала.

Методология и методы проведенного исследования. В теоретической части работы использовали уравнения теплопроводности анизотропных материалов и термоокислительной деструкции термопластичных полимеров, методы реологии нелинейно-вязких сред со степенным законом течения, а также методы подобия и размерностей.

При экспериментальных исследованиях использовали:

- термопластичные полимеры и стеклоровинги промышленного производства и однонаправленно армированные ленты и стренги на их основе, полученные по пултрузионной технологии;
- методы определения показателей нелинейно-вязких свойств и термоокислительной деструкции расплавов термопластичных полимеров и препрегов, методы определения прочности связи между слоями материала;
- специальное оборудование для консолидации в условиях изотермического (при прессовании) и интенсивного неізотермического (при намотке) нагрева, высокоэффективные источники тепла, включая ИК-излучатели, CO₂-лазер и газовую горелку, а также соответствующие средства регулирования и измерения основных параметров этих процессов.

Результаты испытаний подвергли необходимой статистической обработке.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Выполнены комплексные теоретические и экспериментальные исследования консолидации армированных термопластов при формообразовании изделий, в результате которых:

- обобщены на случай нелинейно-вязкого течения матричных полимеров деформационные модели консолидации однонаправленно армированных лент и стренг; разработана и экспериментально подтверждена перколяционная модель консолидации, учитывающая нелинейность вязких свойств матричных полимеров и шероховатость поверхности лент;
- выведены безразмерные комплексы единой структуры и критерии формирования прочной связи между лентами, отражающие силовые и температурно-временные параметры процесса консолидации и нелинейность вязких свойств матричных полимеров, экспериментально подтверждена их адекватность;
- экспериментально установлены зависимости прочности связи лент на основе стеклоровинга и различных термопластичных матричных полимеров – ПЭНД, полипропилена, полиамида-6 – от температуры, давления и продолжительности его действия в процессе консолидации с использованием различных источников тепла, в т.ч. высокоэнергетических – CO₂-лазера и газовой горелки;
- на основе данных о термоокислительной деструкции матричных полимеров сформулированы ограничения на тепловое воздействие в процессах консолидации армированных термопластов;
- разработана и экспериментально подтверждена модель оптимизации параметров технологических процессов формообразования изделий из армированных термопластов по критериям максимальной производительности и минимума энергозатрат.

Практическую значимость полученных результатов характеризуют разработанные на основе исследований:

- методики определения оптимальных режимов консолидации при формообразовании изделий из армированных термопластов путем прессования и намотки лент;
- оптимальные параметры соединения однонаправленных термопластичных лент, в частности, при изготовлении высокопрочных стропов, используемых для монтажа трубопроводов большого диаметра;
- способ управления намоткой однонаправленно армированными лентами окружного силового слоя высокопрочных труб из термопластов с использованием для консолидации лент высокоэнергетических источников тепла.

По оптимальным параметрам изготовлена опытная партия стропов (400 шт.). Экономический эффект от внедрения данного изделия составляет около 30 млн. руб. в год;

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Методы экспериментальной оценки прочности связи лент из армированных термопластов в процессах формообразования изделий, в т.ч. при консолидации с использованием интенсивных источников тепла.

2. Закономерности влияния параметров процессов прессования и намотки на степень консолидации лент из армированных термопластов.

3. Модели консолидации лент из армированных термопластов, безразмерные комплексы параметров процесса и критерии формирования прочной связи при изотермических и неизотермических режимах.

4. Методы оптимизации основных технологических режимов консолидации при формообразовании изделий из армированных термопластов методами намотки и прессования, учитывающие особенности вязкого течения и деструкцию матричного полимера и обеспечивающие наибольшую производительность процесса при минимальных энергозатратах.

Личный вклад соискателя. Соискатель принимал участие в постановке задач исследования, разработке моделей исследуемых процессов, выполнил расчеты и эксперименты, обработал и проанализировал их результаты, готовил публикации по теме исследований, выступал с докладами на научных конференциях. С участием автора внедрены разработанные им методы оптимизации параметров процесса соединения однонаправленных термопластичных лент при изготовлении стропов и труб.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований докладывались на ежегодных научно-технических конференциях БГТУ в 2001–2004 гг.; на международной научно-технической конференции “Новые технологии в химической промышленности” (Минск, 2002); на III международной межвузовской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов (Гомель, 2003); на IV международной научно-технической конференции “Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта” (Новополоцк, 2003); на международной научно-технической конференции “Полимерные композиты–2003” (Гомель, 2003); на VIII республиканской научно-технической конференции студентов и аспирантов (Минск, 2003); на V международной научно-технической конференции “Современные проблемы машиноведения” (Гомель, 2004); на XLIII международной конференции “Актуальные проблемы прочности” (Витебск, 2004).

Опубликованность результатов. Результаты исследований изложены в 16 работах, в т.ч. в 5 статьях, опубликованных в научных журналах, в 4 статьях в сборниках трудов конференций, в 4 тезисах докладов на научно-технических конференциях. Получен патент на полезную модель, поданы две заявки на патентование предполагаемых изобретений. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 45 с.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает введение, общую характеристику работы, пять глав основной части, заключение, список использованных источников и приложения. Общий объем диссертации 108 с., в т.ч. 52 иллюстрации и 17 таблиц, приложения на 3 с. и список литературы из 146 источников на 10 с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы их цель и задачи, дана краткая характеристика результатов.

Первая глава посвящена анализу технологических процессов получения изделий из армированных термопластов, явлений, протекающих при формообразовании изделий, и моделей, применяемых для описания консолидации материала в процессах формообразования изделий.

Как следует из анализа литературных источников, наиболее перспективными технологическими процессами получения высокопрочных изделий из армированных термопластов с ориентированной структурой являются намотка, укладка роликом, пултрузия и прессование в вязкотекучем состоянии (пласт-формование). Ввиду высокой вязкости расплавов термопластичных полимеров для изготовления изделий используют предварительно пропитанные полуфабрикаты в виде лент или стренг (препреги). Нагревание их для придания необходимой формы изделию и формирования плотной и прочной структуры (консолидации) материала в изделии требует значительных затрат времени и энергии, поэтому с целью повышения производительности и снижения энергозатрат в рассматриваемых процессах совмещены стадии формообразования и консолидации, что усложняет как их осуществление, так и оптимизацию параметров.

На основании анализа условий протекания стадий сформулированы требования к источникам тепла и режимам нагрева для консолидации: высокий коэффициент полезного действия; максимально допустимый тепловой поток; концентрация тепла в приповерхностном слое. Этим требованиям удовлетворяют контактный и ИК-нагрев, нагрев с использованием высокоэнергетических источников – CO_2 -лазера и газовых горелок, однако в известных источниках не приводятся обобщающие закономерности и границы применимости их для консолидации армированных термопластов.

В качестве факторов, влияющих на степень консолидации армированных термопластов, указываются шероховатость поверхностей препрегов, реологические свойства матричных полимеров, температура в зоне контакта, давление и продолжительность контакта. Из литературы известны модели консолидации – деформационная, или модель “близкого контакта”, и диффузионная, или модель “залечивания”, которые отражают два основных явления в данном процессе: деформирование неровностей контактирующих поверхностей и взаимную диффузию молекул из одного слоя в другой. Эти модели не учитывают нелинейность вязких свойств матричного полимера, нестационарный характер теплового и силового воздействия в зоне контакта, деструкцию матричных полимеров.

На основании данных аналитического обзора сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе дана краткая характеристика компонентов, используемых для изготовления стренг и лент, методика экспериментального определения показателей вязких свойств, оценки степени консолидации.

В качестве матричных полимеров использовали полипропилен (каплен) марки 2102-16 (Капотнинский нефтеперерабатывающий завод) ТУ 2211-015-00203521-99, полиэтилен низкого давления (ПЭНД) марки 277-73 (ОАО "Ставролен", Россия) ТУ 6-05-1870-79, полиамид-6 вторичный марки ПА6-21Г ТУ 6-13-3-86 (ОАО "Гродно-Химволокно"); в качестве наполнителей – стеклоровинги марок РБТ 13-2400 ТУ РБ 300059047.051-2001 (ОАО "Полоцк-Стекловолокно") и РБО 24-2400 ТУ5952-05763895-047-98 (ОАО "Стекло", Гусь-Хрустальный). Однонаправленно армированные ленты и стренги со степенью наполнения 20–40 мас. % получали на универсальной пултрузионной установке путем пропитки стеклоровинга расплавом полимера.

Показатели вязких свойств расплавов матричных полимеров и предретгов на их основе определяли по методу деформирования образцов между плоскопараллельными плитами.

Параметры шероховатой поверхности лент определяли по ГОСТ 2789-73. Законы распределения ординат профиля строили по профилограммам, полученным с помощью профилографа-профилометра "Калибр" модели 201, и по снимкам микрошлифов.

Исследовали влияние вязких свойств матричного полимера и технологических параметров на степень консолидации при нагреве лент и стренг контактным методом, с помощью ИК-нагревателей и высокоэнергетических источников – CO_2 -лазера (в Физико-техническом институте НАН Беларуси) и газовой горелки (в Научно-исследовательском институте сварки БГНПК порошковой металлургии). Температуру поверхности лент и стренг измеряли бесконтактными термометрами БНТ-03 и Raytek ST 20 Pro. Эксперименты по консолидации в процессе намотки проводили на специально сконструированном оборудовании (рис. 1). Скорость намотки задавали частотным преобразователем типа OMRON.

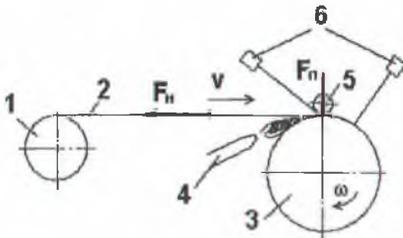


Рис. 1. Схема намотки ленты: 1 – бобина с лентой; 2 – лента; 3 – оправка; 4 – источник тепла (газовая горелка или CO_2 -лазер); 5 – прижимной ролик; 6 – термометр

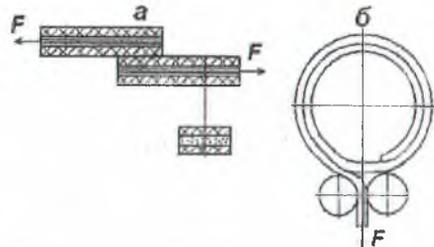


Рис. 2. Схемы испытания соединений лент на прочность при межслойном сдвиге (а) и при отрыве от кольца (б)

Степень консолидации лент оценивали по прочности связи при сдвиге и отслаивании (рис. 2). Приведены формулы для расчета максимальных и средних значений касательных напряжений в соединении при испытаниях на межслойный сдвиг, учитывающие неоднородность структуры материала. Выведены соотношения между усилием отрыва лент, определяемым при испытаниях по схеме на рис. 2, б, удельной работой и вязкостью разрушения.

Влияние теплового воздействия при консолидации оценивали по изменению эффективной энергии активации термоокислительной деструкции матричных полимеров (СТБ 1333.0–2002).

В **третьей главе** изложены результаты анализа основных явлений, протекающих при консолидации лент в процессе формообразования изделий, исследованы их модели.

Процессы нагрева – изотермический (контактный) и неизотермический – перемещающимися источниками: ИК-нагревателем, лучом лазера и струей газовой горелки – описываются дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$v \frac{\partial T}{\partial x} = \left(a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + a_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + a_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_0}{c_p \rho} \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2} + k_q \frac{x}{r_0} \right), \quad (1)$$

где $v = dx/dt$ – скорость перемещения источника; T – температура; x, y, z – координаты в направлении перемещения источника, по ширине и толщине ленты; ρ, c_p, a_x, a_y, a_z – плотность, удельная теплоемкость и коэффициенты температуропроводности материала; k_q, q_0 и r_0 – параметры распределения теплового потока на поверхности ленты.

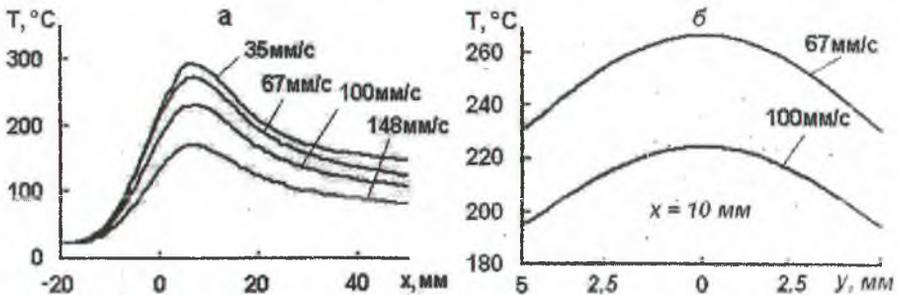


Рис. 3. Распределение температуры в направлении перемещения источника (а) и по ширине ленты (б) при нагреве газовой горелкой (300 Вт).

Распределение температуры на поверхности лент при заданных условиях теплообмена со средой находили, используя приближенное решение (Розенталя, 1946) уравнения (1) и уточненное решение (Пашацкий и Прохоров, 2003), учитывающее неоднородность теплового потока. Типичные профили температуры показаны на рис. 3.

Установлена зависимость температуры поверхности от основных параметров процесса – скорости перемещения и плотности теплового потока. Показано, что при толщине лент до 1 мм температура поверхностного слоя быстро снижается, а сплавление происходит в течение малого промежутка времени. Рассчитаны значения теплового потока и температура в зоне контакта, обеспечивающие консолидацию при высоких скоростях.

Закон вязкого течения расплава матричного полимера принят в виде: $\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}^n$, где τ – касательные напряжения; μ – коэффициент консистенции; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига; n – показатель степени. Температурно-временную зависимость коэффициента консистенции задавали в форме Аррениуса $\mu(T, t) = \mu_0 \cdot \exp(E_v / R_f T(t))$, где μ_0 – константа; E_v – энергия активации вязкого течения расплава; R_f – универсальная газовая постоянная, показателя степени n – в виде: $n(T, t) = 1 - \exp[-(T(t) - T_0) / b_T]^a$, где T_0 , b_T и a_n – параметры, определяемые по экспериментальным данным.

Уравнение термоокислительной деструкции матричного полимера задавали в виде: $t_s = t_0 \cdot \exp(E_d / R_f T)$, где t_s – долговечность (ресурс) изделия при температуре T_s ; t_0 – параметр, имеющий размерность времени и зависящий от критерия оценки и единицы ресурса; E_d – эффективная энергия активации процесса термоокислительной деструкции. Уменьшение эффективной энергии активации на ΔE_d приводит к снижению ресурса изделия в условиях эксплуатации при температуре T_s на $\Delta t_s = t_0 \cdot [\exp(E_d / R_f T_s) - \exp((E_d - \Delta E_d) / R_f T_s)]$. Из этого выражения получена допустимая продолжительность теплового воздействия при консолидации как функция температуры процесса T :

$$t = t_0 \cdot \exp(E_d / R_f T) \cdot [1 - \exp(-\Delta E_d / R_f T)] \quad (2)$$

Модель сплавления стренг под действием сил поверхностного натяжения развита с учетом изменений температуры и нелинейной вязкости матричного полимера. Процесс характеризуется безразмерным комплексом $Z(t^*) = \int_0^{t^*} \left(\frac{\sigma_s(t)}{\mu(T, t) \cdot R} \right) dt$, где σ_s – поверхностное натяжение расплава; R – радиус стренг. Показано, что для достижения пористости не более 0,02 необходимо $Z(t^*) \geq 6,8$. Установлены диапазоны температурно-временных режимов сплавления стренг на основе ПП и ПА6, при которых выполняется это условие.

Деформационная модель процесса консолидации лент обобщена на случай нелинейно-вязкого течения матричного полимера. Согласно простейшему варианту данной модели, степень консолидации определяется как доля заполненных полимером промежутков между выступами на поверхности в результате сжатия этих выступов: $c = b/Sm$, где Sm – средний шаг неровностей (рис. 4). При этом выступы считаются прямоугольными, а

их деформирование рассматривается как вязкое течение расплава между плоскопараллельными плитами. Из решения задачи о сжатии нелинейно-вязкой полосы давлением p получена зависимость степени консолидации от основных параметров процесса:

$$c = c_0 \left(1 + \frac{k_b (2n+3)(n+2)^s}{(2n+1)} \cdot \left(\frac{p}{\mu(T)} \right)^s t \right)^{\frac{n}{2n+3}} \quad (3)$$

где $c_0 = b_0 / Sm$; $k_b = h_0^{s+1} Sm^s b_0^{-2s-1}$ – коэффициент, зависящий от параметров неровностей; b_0 и h_0 – начальные значения ширины и высоты выступов; $s = 1/n$. Формула (3) содержит безразмерный комплекс основных параметров процесса:

$$K_c(t) = \left(\frac{P_0}{\mu(T)} \right)^s t. \quad (4)$$

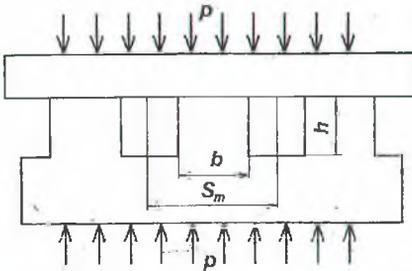


Рис. 4. Схема деформирования выступов на поверхности ленты

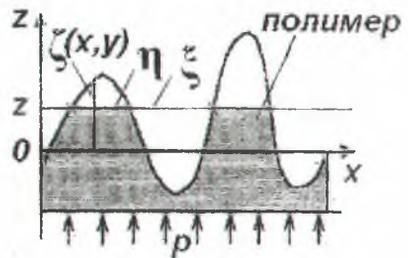


Рис. 5. Схема перколяции расплава во впадины шероховатой поверхности ленты

Вычисления показали, что пренебрежение нелинейностью вязких свойств расплава приводит к недопустимо большой погрешности оценки степени консолидации, при этом расчетные значения продолжительности теплового воздействия могут отличаться на порядок.

Изложена новая, **перколяционная модель** процесса консолидации (сплавания). В основе модели – предположение о связи степени консолидации с относительной глубиной затекания (перколяции) расплава матричного полимера во впадины шероховатой поверхности ленты. Исследованы варианты описания поверхности периодической и случайной функциями.

В статистическом варианте модели шероховатая поверхность ленты задана статически однородным нормальным случайным полем $\zeta(x, y)$ (рис.5). Зависимость между параметрами процесса и относительной глубиной затекания c (степенью сплавания) получена в виде:

$$K_c(t^*) = C \int_0^{\infty} F_{\zeta}^{1+2s}(u) [1 - F_{\zeta}(u)]^{-1} (u)^s du, \quad (5)$$

где

$$K_c(t^*) = \int_0^{t^*} \frac{P^s(t) dt}{\mu^s(T, t)} \quad (6)$$

безразмерный комплекс параметров процесса; $F_c(u)$ – функция нормированного распределения поля $\zeta(x, y)$; u – относительная глубина затекания полимера в слой; C – константа, учитывающая особенности геометрии поверхности, аналогичная константе Козени в теории фильтрации жидкостей.

Установлено, что в перколяционной модели степень консолидации не зависит только от закона распределения ординат профиля. Перколяционная модель, как и другие модели консолидации, не является строгой физической моделью процесса, но отражает влияние всех основных его параметров и, в первую очередь, зависимость степени консолидации от вязких свойств матричного полимера.

На основе перколяционной модели получены *безразмерные комплексы основных параметров процесса сплавления лент* при стационарном режиме консолидации, когда температура и давление постоянны, – это комплекс (4) и при нестационарных условиях консолидации – комплекс (6). В случае консолидации с нагревом источником, движущимся со скоростью v , комплекс (6) преобразуется в безразмерный комплекс:

$$K_c(x^*) = \int_0^{x^*} \left(\frac{P(t)}{\mu(T, x) \cdot v} \right)^s dx \quad (7)$$

В отличие от деформационной и диффузионной моделей перколяционная модель не содержит формальных ограничений на значения K_c . Достаточную степень консолидации, в частности, $c^* = 1 - \Delta c$, где Δc – абсолютная погрешность экспериментальной оценки значений c , обеспечивают режимы, при которых $K_c \geq 4 \times 10^4$.

Исследованы *деформации* однонаправленно армированных лент под действием давления, создаваемого при формообразовании изделий. Получена следующая зависимость относительного изменения толщины $h^* = h/h_0$ формируемого слоя от основных параметров процесса формообразования:

$$K_h(t) = \frac{2n_1 + 1}{2n_1 + 3} \cdot \frac{b^{s_1+1}}{(n_1 + 2)^{s_1}} \cdot \left(h^{* \frac{2n_1+3}{n_1}} - 1 \right), \quad (8)$$

где $K_h(t) = \frac{P^{s_1} t}{[\mu_1(T)]^{s_1}}$ или $K_h(t^*) = \int_0^{t^*} \frac{P^{s_1}(t) dt}{\mu_1^{s_1}(T, t)}$ (9)

– безразмерные комплексы параметров стационарного (в частности, изотермического) и нестационарного процессов формообразования; $\mu_1, n_1, s_1 = 1/n_1$ – параметры степенного закона течения слоя в трансверсальной плоскости; $b = B/h_0$ – относительная, B – начальная ширина ленты.

Рассмотрены случаи равномерного давления (при прессовании), давления от натяжения ленты (при намотке) и от прижатия ленты цилиндри-

ческим роликом (при намотке и укладке). Во всех этих случаях деформации укладываемых лент не превышают 5%, если $K_n \leq 5 \times 10^3$.

Показано, что безразмерные комплексы (4), (6), (7) и (9), определяющие параметры двух основных явлений – деформирования и сплавления, протекающих при консолидации лент, аналогичны по структуре.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального определения характеристик армированных термопластов и проверки моделей консолидации лент при изотермических и неизотермических режимах.

Определены *показатели вязких свойств* матричных полимеров и однонаправленно армированных лент, параметры их температурной зависимости. Найдены зависимости эффективной энергии активации термоокислительной деструкции ПП от температуры и продолжительности контактного и ИК-нагрева. Установлено, что снижение до нижнего нормативного уровня (133 кДж/моль для труб по СТБ 1333.2-2002) происходит в течение менее 1 мин при ИК-нагреве и 5 мин при контактном нагреве (температура 300 °С).

Измерены параметры шероховатости лент. Для лент ПП+РБТ $Ra = 59$ мкм, $Rz = 74$ мкм. Показано, что распределение ординат профиля удовлетворительно описывается нормальным законом со средним квадратическим отклонением $Rq = 70$ мкм. Анализ микрошлифов свидетельствует о том, что профиль поверхности лент в целом сохраняется и после их сплавления.

В результате сравнения расчетных значений *степени консолидации стренг под действием сил поверхностного натяжения* на основе модели, учитывающей нелинейность вязких свойств матричного полимера, с экспериментальными данными получено лучшее соответствие, чем для линейной модели течения полимера, однако подтвердился вывод о незначительном вкладе этой составляющей в реальных процессах консолидации, протекающих при высоких скоростях.

Зависимости от параметров процесса консолидации средних значений касательного напряжения в момент разрушения при межслойном сдвиге лент на основе стеклоровинга и различных матричных полимеров – полипропилена, полиамида-6, ПЭНД, соединяемых внахлестку при *изотермическом режиме*, показаны на рис.6.

Предельное значение, к которому стремится максимальное касательное напряжение в соединении при увеличении температуры и продолжительности сплавления, давления и длины участка контакта практически совпадает с когезионной прочностью матричного полимера. Наблюдаемое в эксперименте уменьшение среднего значения касательного напряжения с увеличением длины соединения согласуется с результатами оценки эффекта концентрации напряжений на краях области контакта. Равнопрочность по критериям межслойного сдвига и разрыва волокон достигнута при дли-

не соединения 15 мм. При дальнейшем увеличении длины разрушение происходит в результате разрыва армирующих волокон.

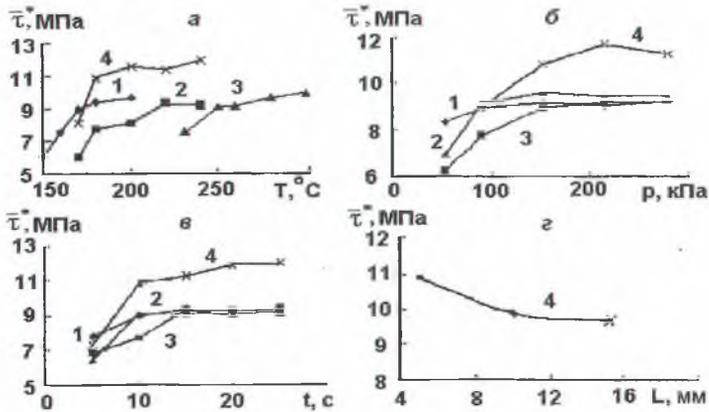


Рис. 6. Зависимости прочности соединения лент от температуры при $t = 10$ с; $p = 90$ кПа (а); от давления при $t = 10$ с (б); от продолжительности контакта при $p = 90$ кПа и $T = 170$ (1), 180 (2, 4) и 260 (3) $^\circ\text{C}$ (в); от длины участка контакта при $t = 10$ с, $p = 90$ кПа и $T = 180^\circ\text{C}$ (г): 1 - ПЭНД+РБТ; 2 - ПП+РБТ; 3 - ПА-6+РБТ; 4 - ПП+РБО

Зависимость относительной прочности соединения $c = \bar{\tau}^* / \bar{\tau}_{\text{max}}^*$ ($\bar{\tau}^*$ – среднее касательное напряжение при разрушении; $\bar{\tau}_{\text{max}}^*$ – когезионная прочность) от безразмерного комплекса параметров процесса консолидации K_c (рис. 7, а) удовлетворительно согласуется с зависимостью, рассчитанной на основе перколяционной модели (5). Коэффициент корреляции между вычисленными и экспериментальными значениями больше 0,9. Зависимость относительной прочности от логарифма безразмерной величины K_c в исследованном диапазоне параметров близка к линейной (см. рис. 7, б).

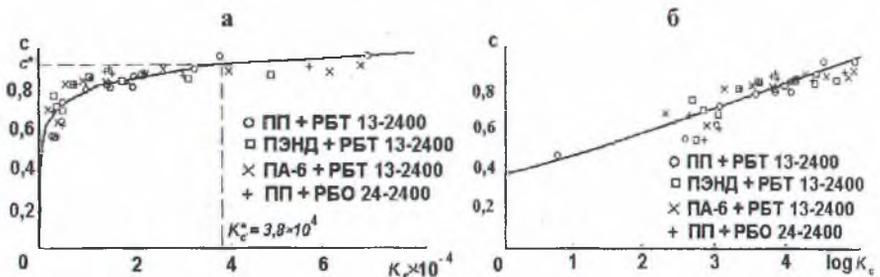


Рис. 7. Зависимость степени консолидации (относительной прочности соединения) от безразмерного комплекса параметров процесса K_c (а) и его логарифма (б)

Изоотермический режим консолидации исследован при намотке однонаправленно армированных лент ПП+РБО на полипропиленовую тру-

бу с нагревом лучом лазера и газовой горелки. Как и следует из теоретического анализа процесса, с увеличением скорости намотки относительная прочность соединения лент уменьшается, а допустимая скорость намотки по мере увеличения теплового потока увеличивается (рис. 8, а). При этом прочность связи между слоями ленты и между лентой и полипропиленовой трубой одинакова. Существует граница, выше которой увеличение силы прижатия ролика становится нецелесообразным, поскольку изменяется характер деформирования ленты.

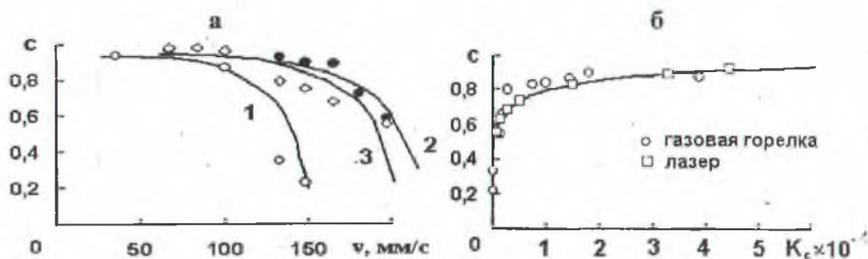


Рис. 8. Зависимость степени консолидации ленты от скорости намотки (а) с нагревом газовой горелкой (1, 2) и лазером (3) при тепловом потоке на поверхности ленты: 1 - 160 Вт; 2 - 320 Вт; 3 - 450 Вт; и от безразмерного комплекса параметров процесса (б). Линии - результаты расчета, точки - экспериментальные данные

Зависимость степени консолидации K_c от безразмерного комплекса параметров, рассчитанная по формуле (7) с учетом изменения температуры в зоне контакта сплавляемых лент как функция расстояния от источника тепла, вполне адекватна результатам эксперимента (рис. 8, б).

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили обоснованность предложенной модели процесса консолидации.

В пятой главе рассматриваются критерии оптимизации режимов и управления процессом консолидации при формообразовании изделий из армированных термопластов и примеры практического применения результатов исследования.

К основным критериям оптимальных режимов технологического процесса отнесены: достаточная прочность связи между слоями (лентами), минимум энергии, затрачиваемой на нагрев, максимум производительности процесса, ограниченные изменения размеров сечения в процессе изготовления, ограниченная степень термоокислительной деструкции.

Комплекс K_c , связывающий согласно уравнению (6) основные параметры процесса сплавления лент, содержит три варьируемых параметра процесса: p , T и t . Дополнительные уравнения получены из условий минимума затрат тепловой энергии: $q(T, t) = \alpha \cdot (T - T_0) \cdot t = \min$ (здесь $q(T, t)$ - плотность теплового потока; α - коэффициент теплоотдачи; T_0 - температура окружающей среды) и ограничения термоокислительной деструк-

ции. Для изотермического нагрева зависимость между температурой T и продолжительностью теплового воздействия t на основании уравнения (2) принята в виде:

$$T(t) = \left[(1 - 0,3 \cdot \delta_E) \cdot \frac{E_d}{R} \right] \cdot \left[\ln^{-1} \left(\frac{t}{t_0} \right) \right] \quad (10)$$

Здесь $\delta_E = \Delta E_d / E_d$ – допускаемое относительное снижение энергии активации термоокислительной деструкции; t_0 – нормативный ресурс изделия.

Условие ограниченной деформации ленты по толщине выведено на основе уравнения (8) и безразмерного комплекса параметров процесса (9) при заданном значении допускаемого уменьшения толщины слоя h_k к исходной толщине ленты h_0 . На основе этих уравнений установлена связь между допускаемым давлением и продолжительностью его действия при соединении лент ПП+РБО ($T = 280$ °С, $h_0 = 0,85$ мм, $h^* = 0,9$), показанная на рис. 9. Заштрихована область допустимых значений параметров. Выделена точка, соответствующая максимальной производительности процесса.

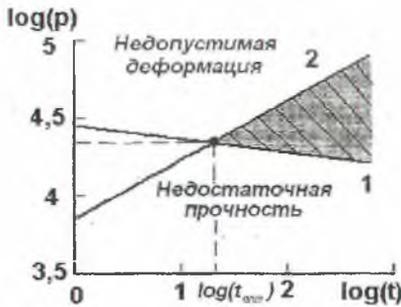


Рис. 9. Границы оптимальных режимов сплавления лент ПП + РБО при пресовании: 1 – по критерию прочности соединения; 2 – по критерию изменения толщины

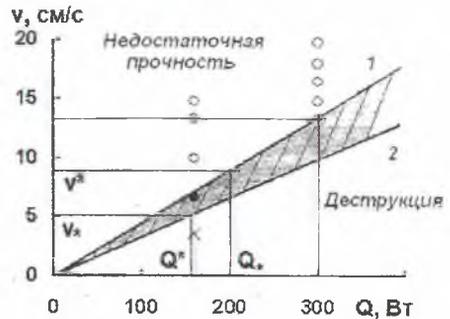


Рис. 10. Зависимости между скоростью намотки и тепловым потоком при намотке ленты ПП+РБТ с нагревом газовой горелкой: 1 – по критерию прочности соединения; 2 – по критерию термоокислительной деструкции. Звездочками обозначены верхние и нижние граничные значения

Метод применен для определения оптимальных режимов консолидации однонаправленно армированных лент шириной 60 мм и толщиной 0,9 мм из ПП каплен и стеклоровинга РБО 24–2400 в высокопрочных стробах длиной 5000 мм. Изделия предназначены для монтажа трубопроводов большого диаметра. Соединения, полученные при оптимальных режимах, равнопрочны основному материалу. Изготовлена опытная партия (400 штук) стробов. Годовой экономический эффект от внедрения изделия составляет около 30 млн. руб.

Для управления процессом сплавления лент при намотке с нагревом интенсивными источниками предложен способ, основанный на результатах анализа процесса консолидации при неизотермических режимах. Установлено, что тепловой поток, задаваемый как по допустимому уровню прочности соединения, так и по допустимому уровню деструкции, изменяется пропорционально скорости намотки (рис.10). Оптимальному режиму соответствует максимально допустимая скорость (производительность процесса намотки) при нижнем уровне теплового потока (т.е. при минимуме энергозатрат), обеспечивающем прочность соединения. Экспериментально подтверждена обоснованность применения данного критерия. Подана заявка на патентование способа управления процессом консолидации.

На основании этих результатов предложена технология нанесения окружного силового слоя на пластмассовые трубы путем намотки однонаправленно армированной ленты. Оптимальные параметры консолидации лент с использованием высокоэнергетических источников тепла определены на базе выполненных исследований. Показано, что при скоростях намотки окружного слоя более 0,2 м/с возможно армирование пластмассовых труб на существующих трубных линиях без нарушения режимов экструзии. Конструкция труб с силовым слоем, получаемым консолидацией однонаправленно армированных лент, защищена патентом на полезную модель. Поданы заявки на патентование способа изготовления. Производство труб из армированных термопластов по предлагаемой технологии позволяет снизить стоимость труб, рассчитанных на номинальное давление до 2,5 МПа, в 2,5–3 раза, повысить температуру эксплуатации до 100–120 °С.

В приложении приведены акты внедрения результатов исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа основных явлений при формообразовании изделий из армированных термопластов разработаны обобщенные модели консолидации однонаправленно армированных лент и стренг, учитывающие нестационарность силовых и тепловых воздействий, нелинейность вязких свойств матричных полимеров и шероховатость поверхности лент [1–3, 7].

2. На базе обобщенных моделей консолидации выведены безразмерные комплексы, отражающие силовые и температурно-временные параметры процесса консолидации и нелинейность вязких свойств матричных полимеров, установлено подобие безразмерных комплексов, определяющих деформирование и сплавление при консолидации, и экспериментально подтверждена их адекватность [1, 4, 5, 9].

3. Установлены зависимости прочности соединения лент на основе стеклоровинга и различных термопластичных матричных полимеров - ПЭНД, полипропилена, полиамида-6 – от температуры, давления и про-

должительности его действия в процессе консолидации в изотермических и неизотермических условиях с использованием различных источников тепла, в т.ч. высокоэнергетических – CO₂-лазера и газовой горелки, сформулированы критерии формирования прочной связи при консолидации лент [4, 5, 6, 9].

4. На основе анализа термоокислительной деструкции матричных полимеров установлены ограничения на тепловое воздействие в процессах консолидации армированных термопластов, выведены соотношения, обеспечивающие учет этого фактора при определении режимов консолидации [4, 5, 10, 16].

5. Разработан и экспериментально подтвержден метод определения оптимальных параметров процесса формообразования изделий из армированных термопластов по критериям максимальной производительности и минимума энергозатрат, включающий критериальные зависимости степени консолидации от основных параметров процесса [4, 5, 9, 11].

6. Разработана технология соединения лент из армированных термопластов при изготовлении высокопрочных стропов, используемых для монтажа трубопроводов большого диаметра [4]. По оптимальным режимам соединения изготовлена опытная партия стропов и внедрена с годовым экономическим эффектом около 30 млн. руб.

7. На основе результатов исследований разработана конструкция труб из армированных термопластов и технология намотки армированной термопластичной лентой окружного силового слоя, позволяющие изготавливать армированные трубы на промышленных экструзионных линиях [8, 12–16].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи. 1. Карпович О.И., Марков А.В., Ставров В.П. Консолидация стренг из армированных термопластов // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2001. – Т. 6, № 1. – С. 40–44.

2. Режимы одностадийной пултрузии профилей из однонаправленно армированных термопластов / Марков А.В., Наркевич А.Л., Карпович О.И., Ставров В.П. // *Труды БГТУ*. – 2001. – Сер. IV, вып. IX. – С. 130–134.

3. Ставров В.П., Карпович О.И., Свириденко А.И. Перколяционная модель консолидации слоев армированных термопластов // *Доклады НАН Беларуси*. – 2003. – Т. 47, № 5. – С. 112–114.

4. Карпович О.И., Ставров В.П. Оптимизация режимов соединения лент из армированных термопластов // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2003. – Т. 8, № 3. – С. 94–99.

5. Карпович О.И., Гоманькова А.Б., Ставров В.П. Режимы высокоскоростной намотки однонаправленно армированных термопластичных лент. – *Материалы, технологии, инструменты*. – 2004. – Т. 9. – № 3. – С. 76–80.

Материалы конференций. 6. Карпович О.И., Ставров В.П. Влияние режимов консолидации на прочность связи лент из армированных термопластов // Сборник материалов межд. межвуз. научно-техн. конф. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2003. – С. 132–135.

7. Ставров В.П., Наркевич А.Л., Карпович О.И. Пултрузионная технология получения стеклоармированных термопластичных материалов и их применение в высокопрочных изделиях // Новые технологии в химической промышленности: Материалы докл. межд. научно-техн. конф. / БГТУ. – Минск, 2002. – С. 55–56.

8. Ставров В.П., Гоманькова А.Б., Карпович О.И., Свириденко А.И. Конструкция и технология изготовления труб из термопластичных полимеров, армированных непрерывными волокнами // Композиционные материалы в промышленности: Материалы межд. конф. – Ялта, 2004. – С. 336–338.

9. Ставров В.П., Карпович О.И. Критерий прочного соединения лент из армированных термопластов // Актуальные проблемы прочности: Материалы XLIII межд. конф./ ВГТУ. – Витебск, 2004. – Ч. II – С. 125–132.

Тезисы докладов. 10. Карпович О.И., Ставров В.П. Управление процессом газопламенного нагрева при соединении лент из армированных термопластов // Современные проблемы машиноведения: Тезисы докл. V межд. конф. – Гомель, 2004. – С. 31–32.

11. Карпович О.И., Ставров В.П. Оптимизация режимов соединения лент из армированных термопластов // Полимерные композиты – 2003: Тез. докл. конф. / Гомель: ИММС НАНБ, 2003. – С. 190–191.

12. Ставров В.П., Гоманькова А.Б., Карпович О.И. Трубопроводы из армированных термопластов // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: Тез. докл. научно-техн. конф. – Новополоцк: ПГУ, 2003. – С. 80–82.

13. Карпович О.И., Гоманькова А.Б., Ставров В.П. Намотка лент из армированных термопластов на полипропиленовую трубу // НИРС–2003: Тез. докл. научно-техн. конф. / БНТУ. – Мн., 2003. – С. 193.

Патенты и заявки на патентование изобретений. 14. Патент № 1322, МПК 7 F 16L 9/133. Труба из термопластичных полимеров, армированных волокнами / Ставров В.П., Карпович О.И., Гоманькова А.Б.; Заявл. 23.05.2003, заявка № u20030229 ВУ.

15. Пат. заявка на изобретение № a20030588 ВУ, МПК 7 F 16L 9/128. Труба из композиционного материала и способ ее изготовления / Ставров В.П., Карпович О.И., Гоманькова А.Б., Наркевич А.Л.; Заявл. 12.06.2003.

16. Пат. заявка на изобретение № a20040371, МПК 7 F 16L 9/128. Способ управления процессом сварки слоев термопластичных полимеров / Ставров В.П., Гоманькова А.Б., Карпович О.И.; Заявл. 22.04.2004.

Карпович Олег Иосифович

Консолидация армированных термопластов при формообразовании изделий

Термопластичные полимеры, течение, деструкция, армированные ленты, намотка, прессование, консолидация, прочность, модели.

Объект исследования – технологические процессы прессования, укладки и намотки лент из термопластов, армированных непрерывными волокнами, и явления, протекающие при консолидации материала в данных процессах. *Предмет исследования* – параметры технологических процессов консолидации армированных термопластов при формообразовании изделий и характеристики материала.

Цель исследования – повышение производительности и управление параметрами консолидации термопластов, армированных непрерывными волокнами, при формообразовании изделий.

Предложены и исследованы модели процессов консолидации – деформирования, уплотнения и соединения однонаправлено армированных лент и стренг, учитывающие нелинейный закон матричных полимеров. Разработана и экспериментально подтверждена перколяционная модель консолидации, учитывающая шероховатость поверхности лент. Выведены безразмерные комплексы и критерии формирования прочной связи между лентами, отражающие силовые и температурно-временные параметры процесса консолидации и нелинейность вязких свойств матричных полимеров, экспериментально подтверждена их адекватность.

Установлены зависимости прочности связи лент на основе стеклорезинга и различных матричных полимеров от температуры, давления и продолжительности его действия в процессе консолидации с контактным и ИК-нагревом, нагревом лучом CO₂-лазера и газовой горелкой. Сформулированы ограничения, обусловленные деструкцией матричного полимера. Разработаны методы определения оптимальных технологических параметров по критериям максимальной производительности процесса формообразования и минимума энергозатрат на консолидацию. Методы применены для определения режимов консолидации лент при изготовлении опытной партии высокопрочных строп для монтажа трубопроводов и режимов намотки лентами силового слоя на пластмассовые трубы с нагревом от высокоэнергетических источников.

Карловіч Алег Іосіфавіч

Кансалідацыя арміраваных тэрмапластаў пры формаўтварэнні вырабаў

Тэрмапластычныя палімеры, цячэнне, дэструкцыя, армаваныя стужкі, намотка, прасаванне, кансалідацыя, трываласць, мадэлі.

Аб'ект даследавання – тэхналагічныя працэсы прасавання, укладкі і намоткі стужак з тэрмапластаў, армаваных непарыўнымі валокнамі, і з'явы, якія працякаюць пры кансалідацыі матэрыялу ў дадзеных працэсах. Прадмет даследавання – параметры тэхналагічных працэсаў кансалідацыі армаваных тэрмапластаў пры формаўтварэнні вырабаў і характарыстыкі матэрыялу.

Мэта даследавання – павышэнне прадукцыйнасці і кіраванне параметрамі кансалідацыі тэрмапластаў, армаваных непарыўнымі валокнамі, пры формаўтварэнні вырабаў.

Прапанаваны і даследаваны мадэлі працэсаў кансалідацыі – дэфармавання, ушчыльнення і злучэння аднакіравана армаваных стужак і стрэнг, якія ўлічваюць нелінейны закон цячэння матрычных палімераў. Распрацавана і эксперыментальна пацверджана перкаляцыйная мадэль кансалідацыі, якая ўлічвае шурпатасць паверхні стужак. Выведзены безразмерныя комплексы і крытэрыі фарміравання трывалай сувязі паміж стужкамі, якія адлюстроўваюць сілавя і тэмпературна-часавыя параметры працэсу кансалідацыі і нелінейнасць вязкіх уласцівасцей матрычных палімераў, эксперыментальна пацверджана іх адекватнасць.

Устаноўлены залежнасці трываласці сувязі стужак на аснове шклорвінгу і розных матрычных палімераў ад тэмпературы, ціску і працягласці яго дзеяння ў працэсе кансалідацыі з кантактным і ІЧ-нагрэвам, нагрэвам промнем CO₂-лазера і газавай гарэлкай. Сфармуляваны абмежаванні, абумоўленыя дэструкцыяй матрычнага палімеру. Распрацаваны метады ўстанаўлення аптымальных тэхналагічных параметраў па крытэрыях максімальнай прадукцыйнасці працэсу формаўтварэння і мінімуму энергызатрат на кансалідацыю. Метады выкарыстаны для вызначэння рэжымаў кансалідацыі стужак пры вырабе эксперыментальнай партыі высокатрывалых стропаў для мантажу трубаправодаў і рэжымаў намоткі стужкамі сілавога слоя на пластмасавыя трубы з нагрэвам ад высокаэнергетычных крыніц.

SUMMARY

Karpovich Aleh

**Consolidation of reinforced thermoplastic
at formation of products**

Thermoplastic polymers, flow, degradation, reinforced tapes, winding, compression, consolidation, strength, models.

Object of research – technological processes of compression, laying and winding of tapes made of thermoplastics, reinforced with continuous fibers, and phenomena occurring at consolidation of the material in these processes. *Subject of research* – parameters of technological processes of reinforced thermoplastics consolidation at formation of products and properties of the material.

Aim of research – increase of productivity and control over parameters of consolidation of thermoplastics reinforced with continuous fibers at formation of products.

Models of consolidation processes, such as deformation, compression and joining of unidirectional reinforced tapes and strengs, taking into account the nonlinear law of matrix polymers, are proposed and investigated. The percolation model of consolidation which is taking into account surface roughness of tapes is designed and confirmed experimentally. Dimensionless complexes and criteria of formation of strong bonds between the tapes, reflecting force and temperature-time parameters of the consolidation process and nonlinearity of viscous properties of matrix polymers are designed, their adequacy is confirmed experimentally.

Dependences of bond strength of tapes (on basis glass roving and different matrix polymers) on temperature, pressure, durability of its effect at consolidation in case of contact and IR-heating, CO₂-laser heating and gas burner heating are established. Limitations stipulated by degradation of matrix polymers are formulated. Methods of determine of optimum technological parameters by criteria of maximum productivity of the formation process and minimum power losses at consolidation are designed. The methods are applied for definition of consolidation conditions of tapes at manufacturing of an experimental batch of high-strength slings for mounting pipelines and for determining conditions of tape winding of a power layer on plastic pipes by high-energy sources heating.

Карпович Олег Иосифович

**КОНСОЛИДАЦИЯ АРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ
ПРИ ФОРМОБРАЗОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ**

Подписано в печать 23.11.2004. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд. л. 1,2.
Тираж 80 экз. Заказ 6556.

Учреждение образования

«Белорусский государственный технологический университет».
220050, Минск, Свердлова, 13а. Лицензия ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220050, Минск, Свердлова, 13.