

678  
M-26

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

УДК 678.073:678.027.9

Марков Александр Владимирович

**ТЕЧЕНИЕ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ  
ПРЕПРЕГОВ В ПРОЦЕССАХ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ**

05.17.06 - Технология и переработка полимеров и композитов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск 2001

Работа выполнена в Белорусском государственном технологическом университете (БГТУ)

Научный руководитель

доктор технических наук,  
профессор Ставров В.И.

Официальные оппоненты:

академик НАН Беларуси,  
доктор технических наук,  
профессор Свириденко А.И.;

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Сергиенко В.П.

Опонирующая организация

Белорусский государственный  
университет транспорта

Защита состоится "30" мая 2001 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.04 в Белорусском государственном технологическом университете, 220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного технологического университета

Автореферат разослан "28" апреля 2001 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук



Толкач О.Я.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Высокие темпы роста объемов промышленного производства изделий из армированных термопластов отражают общую мировую тенденцию повышения производительности технологических процессов, снижения их энергоемкости, улучшения экологических показателей. Среди других типов армированных термопластов перспективны однонаправленные материалы с непрерывными волокнами, отличающиеся высокой прочностью и жесткостью, что позволяет им успешно конкурировать с металлами и сплавами, а также с композитами на основе термореактивных связующих.

Предприятия Беларуси производят в значительных количествах компоненты, пригодные для получения высокопрочных армированных термопластов, и располагают достаточной базой для изготовления изделий из них. В то же время промышленное производство таких материалов и изделий не освоено. Одна из существенных причин - отсутствие отработанных технологических процессов.

Однонаправленные термопластичные препреги как исходный материал для изготовления изделий методами намотки, укладки, пултрузии характеризуются анизотропией и неоднородностью структуры, нелинейностью реологических свойств на стадии формообразования изделий. Это осложняет создание высокопроизводительных технологических процессов, увеличивает затраты на их отработку и оптимизацию режимов. Несмотря на повышенный интерес исследователей, в первую очередь из технологически развитых стран, особенности течения однонаправленных термопластичных препрегов и процессы формообразования изделий из них изучены недостаточно, теоретические основы процессов еще не созданы, что сдерживает их промышленное освоение.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Исследования проведены в рамках госбюджетных тем, финансируемых Минобразованием Республики Беларусь: "Деформативность и прочность анизотропных волокнистых композиционных материалов в вязкопластичном состоянии" (№ ГР 1996558, 1996-1997 гг.); "Аномалии проницаемости волокнистых систем и вязких свойств волокнистых композитов" (№ ГР 19981009, 1998-1999 гг.); "Теоретические основы процессов формообразования изделий из термопластичных полимеров, армированных длинными волокнами" (№ ГР 2000930, 2000-2001 гг.); в рамках задания "Разработать базовые рецептуры, технологию получения и освоить производство стеклоармированных литевых материалов и профилей на основе вторичных полиамидов и других термопластичных полимеров" ГНТП "Ресурсосбережение" (№ ГР 19971646, 1997-1998 гг.); проекта Inposopro международной научно-технической программы Inco-Copernicus, финансируемой Европейской комиссией (контракт № IC15-CT96-0738, 1997-1999 гг.).

**Цели и задачи исследований.** Цель работы - изучить особенности вязкого течения однонаправленных волокнистых препрегов с термопластичной матрицей в процессах формообразования изделий и выработать на этой основе рекомендации по совершенствованию процессов и управлению их параметрами.

Для достижения поставленной цели в ходе исследований решались следующие основные задачи:

1. Разработать методы определения показателей вязких свойств однонаправленного препрега и других анизотропных волокнистых композитов.

2. Установить особенности вязкого течения препрегов, обусловленные нелинейностью и температурной зависимостью вязких свойств полимерного расплава, анизотропией и неоднородностью структуры препрега, разработать адекватные модели течения и определить их параметры.

3. Изучить роль вязкого течения однонаправленного препрега в технологических процессах формообразования изделий методами намотки, укладки роликом и пултрузии и выработать на этой основе практические рекомендации по осуществлению этих процессов.

**Объект и предмет исследования.** Объект исследования - однонаправленные препреги и волокнистые композиты с термопластичной матрицей, процессы вязкого течения препрега при намотке, укладке роликом, пултрузии. Предмет исследования - методы определения, характеристики вязкого течения препрегов, параметры технологических процессов формообразования изделий из них.

**Гипотеза.** Параметры технологических процессов формообразования изделий из однонаправленных термопластичных препрегов методами намотки, укладки роликом и пултрузии определяются преимущественно вязким течением препрега в трансверсальной плоскости.

**Методология и методы проведенного исследования.** В теоретической части работы использовали методы реологии нелинейно-вязкой среды со степенным законом течения, а также метод осреднения - при оценке эффективных характеристик вязких свойств волокнистых композиций.

При экспериментальных исследованиях использовали:

- термопластичные полимеры и стекловолокнистые наполнители промышленного производства;

- пултрузионную и пленочную технологии совмещения компонентов;

- оригинальные методы определения показателей вязких свойств, учитывающие анизотропию структуры препрегов, вид течения и способ приложения нагрузки;

- специальное оборудование для осуществления процессов укладки роликом, намотки и пултрузии и соответствующие средства регулирования и измерения основных параметров этих процессов.

Результаты испытаний подвергали необходимой статистической обработке.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** Впервые выполнены комплексные теоретические и экспериментальные исследования процессов течения однонаправленных термопластичных препрегов и волокнистых композитов на их основе на стадии формообразования изделий. В результате исследований:

- установлены закономерности и выявлены аномалии поведения однонаправленных препрегов в вязкотекучем состоянии с учетом нелинейности вязких свойств матричного полимера, неоднородности и анизотропии структуры препрега, влияния граничных условий на процесс течения; найдены параметры уравнений, адекватно описывающих процессы течения препрегов;
- получены новые данные об особенностях течения анизотропных волокнистых композитов различной структуры;
- разработаны и экспериментально подтверждены адекватные модели вязкого течения однонаправленных препрегов в процессах формообразования изделий - при намотке, укладке роликом и пултрузии, показана преобладающая роль сдвигов в трансверсальной плоскости;
- установлены соотношения, позволяющие рассчитать параметры процесса формообразования изделий по характеристикам вязких свойств матричного полимера и препрега, оптимизировать технологические режимы получения изделий с учетом неоднородности структуры и нелинейности закона течения препрега.

**Практическую значимость полученных результатов** характеризуют разработанные на основе исследований:

- методы экспериментального определения параметров степенного закона течения однонаправленных термопластичных препрегов и анизотропных композитов в условиях формообразования изделий;
- технологические основы процессов формообразования изделий из однонаправленно армированного термопластичного препрега - намотки, укладки роликом и пултрузии;
- одностадийная технология получения профильных изделий из термопластичных полимеров, однонаправленно армированных стеклоармированным;
- технические условия на профили из стеклоармированных термопластов.

На универсальной пултрузионной установке выпущены опытные партии профильных изделий из полиамида-6 и полипропилена, армированных стеклоармированным. Стеклоармированные профили внедрены в качестве раскладок для крепления панелей в салонах трамвайных вагонов и в качестве штанг-держателей сепараторов зерноочистительных машин. Использование 1 т стеклоармированных профилей из термопластов взамен алюминиевых дает экономию 1500-2000 долларов США.

***Основные положения диссертации, выносимые на защиту:***

1. Методы определения характеристик однонаправленных термопластичных препрегов и анизотропных композитов в вязкотекучем состоянии.

2. Особенности вязкого течения однонаправленных препрегов и волокнистых композитов с термопластичной матрицей, обусловленные нелинейностью вязких свойств полимера, анизотропией и неоднородностью структуры препрега и условиями на границе.

2. Модели и методы расчета основных параметров технологических процессов формообразования изделий из однонаправленных термопластичных препрегов - намотки, укладки роликом и пултрузии - и закономерности влияния показателей вязких свойств термопластичного препрега и матрицы.

4. Технологические основы пултрузии профильных изделий из термопластов, однонаправленно армированных стеклоровингом.

***Личный вклад соискателя.*** Соискатель принимал непосредственное участие в постановке задач исследования, проведении экспериментов, обработке результатов и их практическом применении, в подготовке докладов и публикаций по теме исследований.

***Апробация результатов диссертации.*** Результаты работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях БГТУ в 1997-2000 гг.; на 3-й Республиканской научно-технической конференции "Новые материалы и технологии" (Минск, 1998); на Международной научно-технической конференции "Современные проблемы машиноведения" (Гомель, 1998); на Международной научно-технической конференции "Разработка импортозамещающих технологий и материалов в химической промышленности" (Минск, 1999); на Международной научно-технической конференции "Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка" (Могилев, 1999); на 11-й Международной конференции по механике композиционных материалов (Рига, 2000); на Международной научно-технической конференции "Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической промышленности и производстве строительных материалов" (Минск, 2000); на Международной научно-технической конференции "Полимерные композиты-2000" (Гомель, 2000).

***Опубликованность результатов.*** Основные результаты исследований изложены в 20 работах, в т.ч. в 7 статьях в научных журналах, в 3 статьях, опубликованных в сборниках трудов конференций, в 9 тезисах докладов на научно-технических конференциях. Подана заявка на патентование предполагаемого изобретения. Общий объем работ, опубликованных по теме диссертации, составляет 68 с.

***Структура и объем диссертации.*** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, перечня условных обозначений, 5 глав основной части, заключения, списка использованных источников и трех

приложений. Полный объем диссертации 146 с., включая 66 иллюстраций и 21 таблицу на 38 с., приложения на 11 с. и список литературы из 190 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований по теме диссертации, сформулирована цель работы.

В **первой главе** содержится анализ методов получения однонаправленных термопластичных препрегов в виде лент и стренг и технологических схем производства из них изделий различной геометрии - пултрузии профилей, намотки тел вращения и укладки роликом при формообразовании плоских изделий (рис. 1). Рассмотрены особенности процессов при различных схемах совмещения компонентов при изготовлении препрега - волоконной, порошковой и расплавной (пултрузионной).

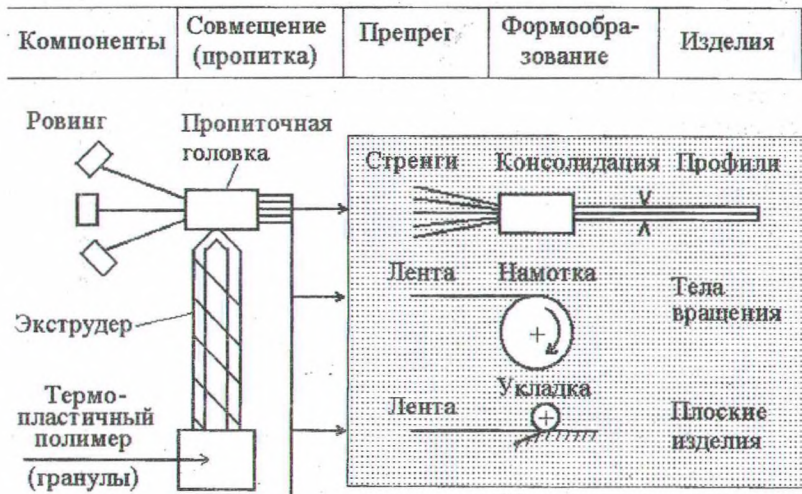


Рис. 1. Схемы получения изделий из однонаправленных термопластичных препрегов

На основе анализа литературных источников показано, что при формообразовании изделий из термопластичных препрегов вязкое течение матрицы и однонаправленного препрега проявляется в виде фильтрации полимера через волокнистый слой, сдвига препрега в трансверсальной плоскости, сдвига параллельно волокнам и межслойного сдвига. Параметры вязкого течения определяют для каждого вида течения, создавая соответствующие условия деформирования образца. В работах, посвященных теоретическому описанию вязких свойств термопластичных полимерных

расплавов, в т.ч. армированных волокнами, чаще других используют степенной закон течения, однако сведения об экспериментальных методах определения параметров нелинейных законов течения однонаправленных препрегов и анизотропных волокнистых композитов (АВК) с термопластичной матрицей в литературе отсутствуют. Для описания процессов формообразования изделий используют преимущественно линейную модель вязких свойств, хотя ее адекватность применительно к вязкотекучему состоянию армированных термопластов подвергается сомнению.

По информации, содержащейся в литературных источниках и описаниях зарубежных патентов, дана характеристика основных процессов формообразования изделий из однонаправленных термопластичных препрегов, в т.ч. одностадийных (*on-line*) процессов, показаны перспективы их промышленного применения. В то же время отмечено, что в опубликованных работах практически отсутствуют сведения о связи между вязкими свойствами препрегов, с одной стороны, и технологическими параметрами процесса формообразования, геометрическими характеристиками изделий и структурой материала, - с другой, не разработаны теоретические основы процессов формообразования изделий из термопластичных препрегов.

На основании анализа литературных источников поставлены задачи и определены основные направления диссертационного исследования.

**Во второй главе** дана краткая характеристика компонентов, используемых для изготовления препрегов и АВК различной структуры, описана технология изготовления образцов, методика проведения экспериментальных исследований вязких свойств препрегов и АВК и определения параметров технологических процессов формообразования изделий.

Препрег для экспериментальных исследований вязких свойств и процессов течения при формообразовании изготавливали на универсальной пултрузионной установке на базе червячного пресса ЧПЗ2-25 как генератора полимерного расплава, созданной для проведения работ по проекту Inposompro.

В качестве матричных полимеров использовали вторичный полиамид-6 марки 21Г (Гродненское ПО "Химволокно"), ПЭВД марок 16204-020 (ПЭВД I) и 15803-200 (ПЭВД II) (Полоцкое ПО "Полимир"); полипропилен (каплен) марки 2102-16 (Капотнинский нефтеперерабатывающий завод), в качестве наполнителя - стеклоровинг марок РБТ10-2400, РБТ13-2400 и РБН18-5000 (Полоцкое ПО "Стекловолокно"). Степень наполнения препрега от 20 до 40 мас. %. В отдельных случаях применяли также пленочную технологию совмещения компонентов, другие компоненты и материалы, в т.ч. со степенями наполнения до 60 об. %.

Показатели вязких свойств однонаправленного препрега и АВК определяли, используя разработанные с участием автора оригинальные методы, учитывающие анизотропию и неоднородность структуры препрегов, вид течения и способ приложения нагрузки:

- при сдвиге в трансверсальной плоскости - метод деформирования полосы между плоскопараллельными плитами;
- при сдвиге в плоскости армирования - метод растяжения по диагонали квадратного образца, закрепленного в рамке;
- при межслойном сдвиге - изгиб по трехточечной схеме и растяжение надрезанных образцов.

Показатели вязких свойств матричного полимерного расплава и хаотически наполненных волокнистых композитов определяли по методу сжатия диска между плоскопараллельными плитами.

Изложены теоретические основы разработанных в диссертации методов, алгоритмы обработки результатов измерений, а также сведения, характеризующие адекватность оценки показателей вязких свойств.

Параметры вязкого течения однонаправленного слоя при намотке, укладке роликом и сплавлении стренг определяли на специально сконструированных установках, оснащенных необходимыми средствами измерения. Эксперименты по пултрузии профильных изделий проводили на универсальной пултрузионной установке, оснащенной консолидирующими и профилирующими устройствами, средствами измерений. Температуру измеряли бесконтактным термометром БНТ-03; усилия и перемещения - с помощью тензорезисторных преобразователей, подключенных к ПЭВМ через АЦП типа ADAM.

Механические свойства профилей, полученных методом пултрузии, определяли по результатам испытаний на растяжение и изгиб. Кольца, изготовленные намоткой препрега, испытывали на прочность при растяжении полудисками по ГОСТ 25.603-82. Прочность аутогезионной связи слоев определяли по методу отрыва.

В **третьей главе** изложены результаты теоретических исследований особенностей вязкого течения однонаправленного термопластичного препрега в процессах формообразования, обусловленных нелинейностью вязких свойств матричного полимера, неоднородностью структуры препрега и граничными условиями при течении.

*Влияние структуры препрегов на процесс течения* исследовали с помощью т.н. модели первого порядка, согласно которой скорость сдвига элемента, содержащего волокна, предполагается пропорциональной скорости сдвига прослойки матрицы, при этом коэффициент пропорциональности равен относительной толщине прослойки. Увеличение вязкости препрега по отношению к вязкости полимерного расплава определяет среднее значение этой величины  $f(P)$ , зависящее от степени наполнения  $P$  и от распределения параметров  $\zeta$  и  $\eta$ , характеризующих структуру препрега, а также от показателя степени  $n$  в законе течения полимера:



$$f(P) = \left\langle \left( \frac{\zeta}{\eta} \right)^n \right\rangle. \quad (1)$$

Приближенная оценка этой функции представлена в виде:

$$f(P) = [(1+P)(1-P)^{-1}]^n. \quad (2)$$

Получены оценки коэффициентов вязкости однонаправленных препрегов при сдвиге в трансверсальной плоскости и в плоскости волокон. Исследовано влияние несовершенной пропитки (пористости) и наличия прослойки полимера на коэффициенты вязкости препрега, влияние способа закрепления образца при нагружении в плоскости армирования. Показано, что в случае однородной структуры коэффициенты вязкости препрега при сдвиге в главных плоскостях симметрии совпадают, они линейно возрастают с увеличением степени наполнения (по крайней мере в области  $P \leq 0,3$ ). Неоднородность препрега (пористость и наличие прослоек полимера) служит причиной аномального снижения вязкости, при этом в большей мере снижается сопротивление сдвигу при закреплении образца параллельно направлению волокон.

Предложенная модель и метод численной оценки относительной вязкости позволяют объяснить закономерности влияния структуры препрега и граничных условий, а также аномалии вязкого поведения, наблюдаемые в экспериментах.

**Модель укладки однонаправленного препрега** роликом построена на основе нелинейной модели вязкого деформирования однонаправленного слоя при сжатии в трансверсальной плоскости (рис. 2). Установлена зависимость толщины формируемого слоя от скорости перемещения и диаметра ролика.

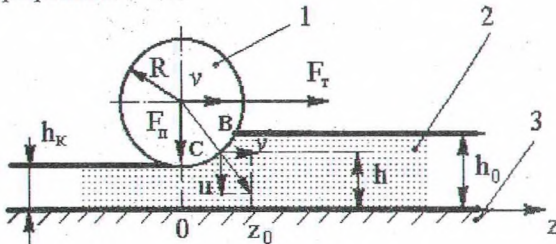


Рис. 2. Схема укладки препрега роликом:  
1 - ролик; 2 - лента препрега; 3 - формирующая поверхность

Зависимости усилия прижатия  $F_n$  и силы сопротивления перемещению ролика  $F_T$  от параметров вязкого течения препрега (коэффициента вязкости  $k$  и показателя степени в законе течения  $n$ ) и параметров процесса - толщины  $h_0$  исходного слоя, площади сечения  $S$ , скорости  $v$ , радиуса ролика  $R$  - получены в виде:

Зависимости усилия прижатия  $F_n$  и силы сопротивления перемещению ролика  $F_T$  от параметров вязкого течения препрега (коэффициента вязкости  $k$  и показателя степени в законе течения  $n$ ) и параметров процесса - толщины  $h_0$  исходного слоя, площади сечения  $S$ , скорости  $v$ , радиуса ролика  $R$  - получены в виде:

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

где  $D = k(s+2)^n S^{n+2} v^n (n+2)^{-1} R^{-n}$ ;  $s = 1/n$ .

На числовых примерах проиллюстрированы возможности управления процессом, оптимизации его параметров. Показано, что при формировании слоя заданной толщины  $h_k$  требуемое усилие прижатия ролика является линейной функцией коэффициента вязкости препрега и степенной функцией скорости перемещения ролика, при этом показатель степени равен показателю степени в законе течения препрега.

**Модель намотки кольца лентой препрега** (рис. 3) учитывает сжатие препрега под давлением, создаваемым усилием натяжения ленты, и сдвиг полимерной прослойки.

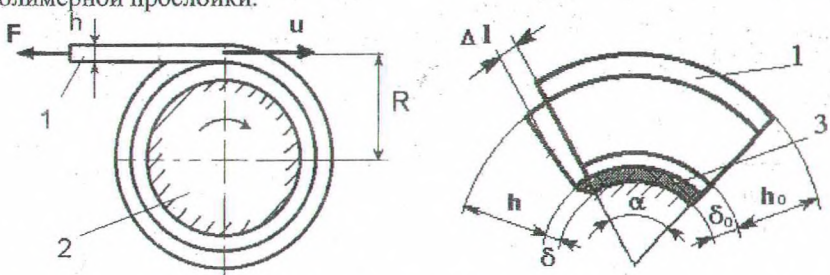


Рис. 3. Схема намотки кольца лентой: 1 - лента; 2 - оправка; 3 - прослойка

Выведены уравнения, определяющие зависимость толщины слоя  $h$  и напряжений в нем  $\sigma$  от параметров степенного закона течения препрега ( $k$ ,  $n$ ) и матричного полимера ( $\mu$ ,  $m$ ) и от основных параметров процесса намотки - площади сечения слоя  $S$ , исходного натяжения  $\sigma_0$ , скорости укладки  $u$ , радиуса оправки  $R$ .

Закон изменения толщины слоя  $h_\alpha = h(\alpha)$  получен как обратная функция текущего угла обхвата  $\alpha$ :

$$\alpha(h_\alpha) = -uR^{s-1} \left[ \frac{k(s+2)^n S^{n+1}}{n+2} \right] \int_{h_0}^{h_\alpha} \sigma^{-s}(h) h^{-3(1+s)} dh. \quad (4)$$

Зависимость между напряжением  $\sigma$  и изменяющейся ввиду вязкой деформации препрега и прослойки толщиной слоя  $h_\alpha$  в произвольном сечении наматываемого кольца:

$$\sigma(h) = \left[ \sigma_0^q + C(h^{j+1} - h_0^{j+1}) \right]^{1/q}, \quad (5)$$

где  $C$  - константа, зависящая от параметров препрега и условий намотки;  
 $j = 3s(m-1) + 2m - 4$ ;  $q = s(1-m) + 1$ .

В результате численного решения системы уравнений (4) и (5) найдены зависимости напряжений и толщины слоя как функции натяжения ленты, угла обхвата и - через показатели вязких свойств препрега и прослойки - от температуры. Полученные соотношения устанавливают влияние основных технологических факторов на процесс намотки.

**При одностадийной пултрузии** профильные изделия формируются в результате консолидации (сплавления) системы стренг, полученных после протягивания стеклоровинга через пропиточную головку, и профилирования однонаправленного слоя (см. рис. 1).

Приближенная модель механизма сплавления цилиндрических стренг с параллельными осями основана на подходе, типичном для теории спекания. Продолжительность  $t$  сближения стренг диаметром  $d$ , имеющих эффективную вязкость  $\mu_e$ , под действием поверхностного натяжения  $\sigma_s$  найдена из энергетических соображений - приравниванием работы сил поверхностного натяжения и работы внутренних сил, обусловленных вязким течением. В качестве условия достаточной степени сплавления принято достижение модифицированным критерием Онезорге  $Z(t) = \sigma_s t / (\mu_e d)$  значения, равного единице, что соответствует пористости  $\Pi^* = 0,02$ .

Зависимость плотности консолидируемого материала  $\rho$  от давления  $p$  принята в известном из теории уплотнения виде:

$$\rho = \rho^* - (\rho^* - \rho_0) \exp(-p/\Psi). \quad (6)$$

Здесь  $\rho_0$  и  $\rho^*$  - начальная и предельно достижимая плотность;  $\Psi$  - параметр, зависящий от вязкопластических свойств уплотняемого материала. Параметры, входящие в уравнение (6), и адекватность уравнения оценивали по результатам измерения плотности пучка стренг.

Распределение давления при профилировании однонаправленного слоя в пултрusionной головке (рис. 4) рассчитывали, основываясь на модели течения слоя при сдвиге в трансверсальной плоскости:

$$p(x) = \frac{kv_0(s+2)^n B^{n+1}}{h(z)^{2n+1}(n+1)} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{B} \right)^{n+1} \right]. \quad (7)$$

Здесь  $v_0$  - скорость сжатия слоя, связанная со скоростью пултрузии  $U$  соотношением  $v_0 = U \operatorname{tg} \alpha$  ( $\alpha$  - угол входа в головку). Другие обозначения - на рис. 4.

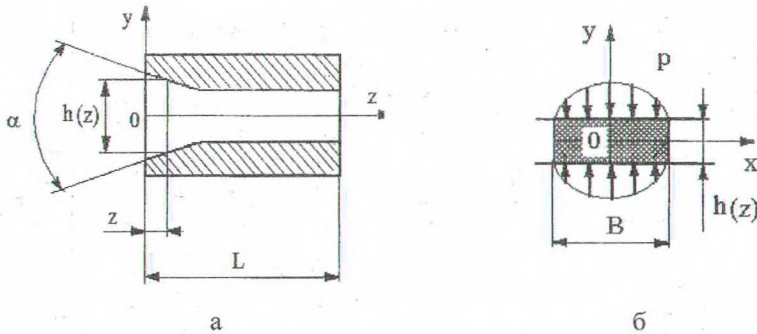


Рис. 4. Схемы пултрузионной головки (а) и деформирования слоя (б)

Усилие пултрузии находили путем интегрирования касательных напряжений по формообразующей поверхности головки. Расчеты показали, что при изотермических условиях давление в головке и соответственно усилие пултрузии возрастают с увеличением вязкости препрега, угла входа в головку и скорости пултрузии. При одностадийном процессе должно учитываться изменение температуры препрега на участках от пропиточной до профилирующей головки. Прямой расчет распределения температуры затруднен из-за сложных условий теплоотдачи на различных участках перемещения стренг и изменения их геометрии. В связи с этим предложен расчетно-экспериментальный метод оптимизации режимов пултрузии.

В четвертой главе изложены результаты экспериментального исследования вязких свойств однонаправленных термопластичных препрегов и зависящих от них параметров процессов формообразования изделий.

Исследования подтвердили адекватность степенного закона течения для всех реализованных в эксперименте схем деформирования препрегов и АВК в диапазоне скоростей сдвига, типичных для формообразования изделий. При этом установлено, что показатель степени в законе течения зависит от структуры АВК и от вязких свойств матричного полимера. Температурная зависимость коэффициента вязкости соответствует уравнению Аррениуса. С увеличением температуры показатель степени в законе течения увеличивается (рис. 5). Независимо от структуры АВК и вида течения увеличение степени наполнения приводит к росту коэффициента вязкости и снижению показателя степени (см. рис. 5). При высоких степенях наполнения (более 30 об.%) наблюдается anomalous снижение вязкости, обусловленное несовершенной пропиткой волокнистого наполнителя (рис. 6). С увеличением вязкости расплава матричного полимера экстремум вязкости смещается в область более низких концентраций наполнителя.

Неоднородность структуры АВК - неравномерное размещение наполнителя и наличие полимерных прослоек - служит причиной повышенного

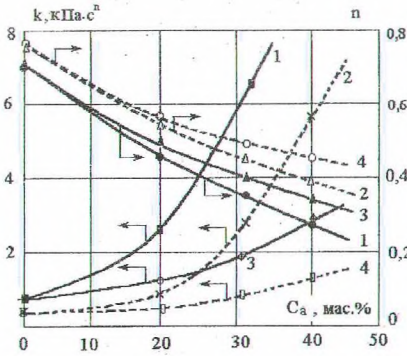


Рис. 5. Зависимость параметров закона течения полиамида-6 от степени наполнения стекловолокном: 1, 2- хаотический (литье); 3, 4- однонаправленный; 1, 3- 240°C, 2, 4- 280°C

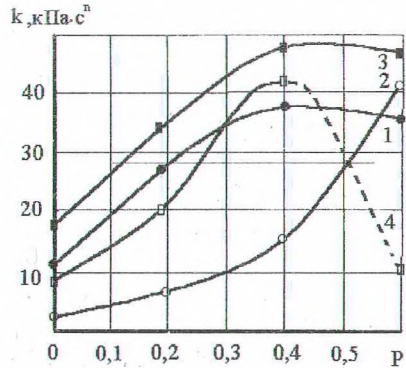


Рис. 6. Зависимость коэффициента вязкости однонаправленного препрега от степени наполнения стекловолокном полимеров: 1 - ПЭВД I (180°C); 2- ПЭВД II (220°C); 3 - ПП (180°C); 4 - ПП (220°C)

разброса показателей вязких свойств и аномального снижения коэффициента вязкости при сдвиге в трансверсальной плоскости (при сжатии полосы между плитами), при сдвиге в плоскости армирования (путем растяжения по диагонали квадратных пластин) и при межслойном сдвиге (при растяжении надрезанных образцов). При этом вязкие деформации препрега и АВК локализуются преимущественно в прослойках полимера, а показатели вязких свойств приближаются к показателям вязких свойств полимерного расплава. Характер влияния структуры препрегов и АВК на показатели вязкости соответствует результатам расчета по формулам (1) и (2).

По разработанным методам определены характеристики вязких свойств препрегов на основе стекловолокна и термопластичных полимеров - ПЭВД, ПП, ПА-6 - использовавшихся при экспериментальном исследовании процессов формообразования изделий (см. рис. 5 и 6, табл. 1).

Экспериментальные исследования силоскоростных режимов процесса укладки роликом однонаправленно армированного термопластичного слоя на основе ПЭВД I и стекловолокна подтвердили адекватность предложенной модели процесса. Измеренные значения толщины слоя, усилий прижатия ролика и сопротивления его перемещению удовлетворительно согласуются с рассчитанными по характеристикам вязких свойств препрега (рис. 7).

В результате экспериментального исследования процесса намотки колец препрегом на основе полипропилена и стекловолокна (40 мас. %) установлено, что вязкие свойства препрега и матрицы в большей степени

вливают на относительное изменение толщины слоев, чем на напряжения в них.

Таблица 1

Параметры степенного закона течения  
однонаправленных препрегов при сдвиге  
в трансверсальной плоскости

Матрица	$C_a$ , мас. %	$T$ , °C	$n$	$k$ , кПа·с <sup>n</sup>
ПП	20	160	0,19	3,2
		180	0,35	2,7
		200	0,36	2,2
	30	200	0,44	2,1
	40	200	0,28	2,8
ПА-6	20	240	0,28	2,5

С увеличением температуры роль вязкого течения препрега и матрицы усиливается (рис. 8), возрастают прочность при разрыве и прочность аутогезионной связи слоев, однако наблюдаемая при этом фильтрация полимерного расплава приводит к большей неоднородности структуры композита в кольце.

Увеличение скорости намотки ведет к снижению температуры препрега и продолжительности контакта и, соответственно, к снижению прочностных характеристик. Установленные в результате расчета и экспериментов оптимальные параметры намотки препрегом ПП+СВ40 кольца диаметром 150 мм (температура - 180 - 200°C; давление 20-25 кПа; скорость - до 5 мм/с) коррелируют с данными других исследователей.

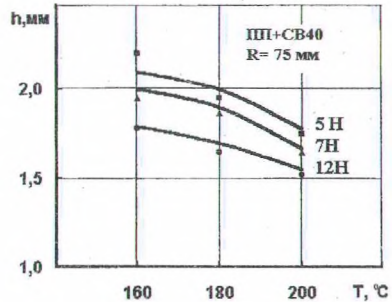
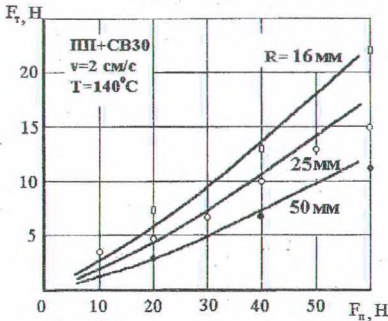


Рис. 7. Зависимость тянущего усилия от силы прижатия ролика

Рис. 8. Зависимость толщины кольца от температуры и натяжения ленты

Эффективный коэффициент поверхностного натяжения, найденный по кинетическим кривым сближения однонаправленных стренг в процессе консолидации, существенно отличается от значений, приводимых в литературных источниках для ненаполненных полимерных расплавов. Скорость сближения стренг под действием поверхностного натяжения недостаточна для высокопроизводительных одностадийных процессов пултризирования профильных изделий. Для консолидации стренг необходимо приложить внешнее давление, зависящее от эффективной вязкости стренги (рис. 9).

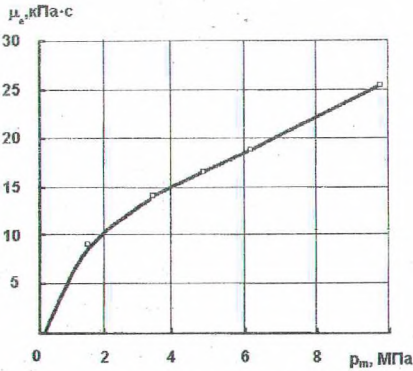


Рис. 9. Зависимость между эффективной вязкостью и давлением уплотнения стренг ПП+СВ20...40, ПА-6+СВ20

препрега, хорошо воспроизводятся в эксперименте (рис. 10).

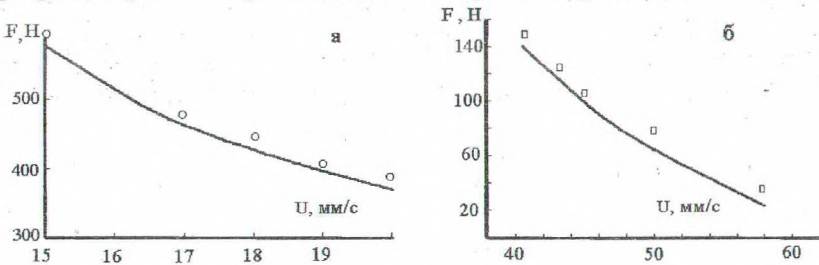


Рис. 10. Зависимость усилия от скорости пултрузии при профилировании стержней из препрега ПП+СВ20 (а) и ПА-6+СВ20 (б). Линии – расчет, точки – эксперимент

На основании исследований температурных и силоскоростных режимов пултрузии отработаны технологические параметры одностадийного процесса, обеспечивающие получение профильных изделий с площадью поперечного сечения до  $100 \text{ мм}^2$  при степени армирования до 30 об.% и скорости до 5 см/с. Производительность универсальной пултрузионной установки составляет при этом 20–25 кг/ч. Решены известные из публикаций по теме пултрузии армированных термопластов проблемы прилипания расплава к поверхностям формующей оснастки и обусловленного им образования "бороды" и каверн на поверхности изделия. Подана заявка на патентование способа получения профильных изделий из термопластов, одноплавленно армированных волокнами.

В пятой главе приведены сведения о практическом применении результатов исследований.

Установлено, что одностадийный процесс пултрузии профильных изделий протекает при нестационарном температурном режиме. Показана зависимость температуры и усилия пултрузии от скорости протягивания стренг. При этом ввиду изменения вязкости расплава по мере увеличения скорости процесса усилие снижается и возрастает при более интенсивном охлаждении стренг. Значения усилия, рассчитанные с учетом обусловленных температурным режимом изменений вязкости

На универсальной пултрузионной установке по одностадийной технологии изготовлены опытные партии профилей из стеклоармированных термопластов - полиамида-6 и полипропилена. Даже при относительно низкой степени наполнения стекловолокном (9-12 об. %) профили имеют прочностные характеристики, близкие к характеристикам профилей из деформируемых алюминиевых сплавов (табл. 2). С увеличением степени наполнения характеристики прочности пропорционально возрастают. Разработаны технические условия на профильные изделия из стеклоармированных термопластов.

Таблица 2

Показатели упругих, прочностных и вязкоупругих свойств профилей из стеклоармированных термопластов

Материал	$E_p$ , ГПа	$\sigma_p$ , МПа	$E_{и}$ , ГПа	$\sigma_{и}$ , МПа	$\tau_{ср}$ , МПа	$E_t$ , ГПа	$H_t$ , ГПа	$t$ , с
ПП+СВ20	10,4	164	9,14	117	54,5	9,4	8,1	61
ПА-6+СВ20	10,7	170	9,38	202	74,6	9,7	9,2	97

Высокопрочные стеклоармированные профили из термопластов прошли опытно-промышленную проверку и внедрены в качестве раскладок для крепления панелей в салонах трамвая, в качестве штанг-держателей сепараторов зерноочистительных машин. Они могут найти применение в качестве экономически эффективной альтернативы алюминиевым профилям в строительстве, в машиностроении в мебельной промышленности, в электроэнергетике и других отраслях промышленности. Стоимость одного погонного метра профилей на основе ПА-6 или ПП со степенью наполнения 20-30 мас.% в 1,5-2 раза ниже стоимости профилей такого же сечения из алюминиевых сплавов при равных характеристиках прочности. Это позволяет экономить 1500-2000 долларов США при использовании каждой тонны профилей из стеклоармированных термопластов.

Исследованные в диссертации процессы намотки однонаправленной термопластичной лентой и укладки роликом могут быть использованы для изготовления изделий различного назначения, имеющих форму вращения (колец, сосудов давления, труб), для которых важно сочетание технологических и эксплуатационных (например, химической стойкости) свойств полимеров и высокой жесткости и прочности армирующих волокон.

В качестве приложений приводятся технические условия на профили из стеклоармированных термопластов и акты опытно-промышленной проверки и внедрения результатов работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексных теоретических и экспериментальных исследований установлены закономерности вязкого течения однонаправлен-



ных термопластичных препрегов, создающие основу для совершенствования процессов формообразования изделий методами укладки роликом, намотки и пултрузии и управления параметрами этих процессов.

1. Разработаны методы экспериментального определения показателей вязких свойств однонаправленных термопластичных препрегов и анизотропных волокнистых композитов при различных видах течения. Показано, что в диапазоне температур и скоростей сдвига, типичных для процессов формообразования изделий, вязкое течение препрегов удовлетворительно описывается степенным законом. Найдены параметры закона течения, зависящие от вязких свойств матричного полимера, вида течения и структуры препрега [1-3, 9, 10, 17].

2. Разработана модель вязкого течения однонаправленного термопластичного препрега, характеризующая влияние структуры материала, вида течения и граничных условий на показатели вязких свойств. В результате расчетов на основе данной модели и экспериментальных исследований установлено, что с увеличением степени наполнения волокнами коэффициенты вязкости увеличиваются, а показатель степени в законе течения уменьшается. Неоднородность препрега, обусловленная несовершенной пропиткой и наличием прослойки связующего, приводит к аномальному снижению вязкости [1, 3, 5, 9, 10, 17].

3. Предложены модели течения однонаправленного термопластичного препрега в технологических процессах формообразования изделий - при укладке роликом на плоскую поверхность, при намотке колец, при консолидации стренг под действием сил поверхностного натяжения и давления, при профилировании в пултрузионной головке. Показано, что во всех указанных процессах преобладает течение препрега путем сдвига в трансверсальной плоскости. Найдены соотношения, связывающие показатели вязких свойств препрега с параметрами процесса формообразования. Экспериментально подтверждена адекватность предложенных моделей [4, 6, 7, 12, 14-16, 18, 19].

4. Установлено, что при намотке колец из однонаправленных термопластичных лент наряду со сдвигами в трансверсальной плоскости на толщину и натяжение формируемого слоя влияет течение прослойки матричного полимера. Снижение вязкости полимера и укладка роликом при намотке способствуют повышению производительности процесса, прочности связи между слоями, однако при этом более существенно уменьшается толщина формируемого слоя [5, 6, 16, 19].

5. Поверхностное натяжение расплава не обеспечивает достаточно высокой скорости консолидации стренг в вязкотекучем состоянии. Для формирования плотной структуры материала при пултрузии необходимо приложить давление, зависящее от эффективной вязкости препрега. При одностадийной пултрузии охлаждение стренги на участке между пропиточной и профилирующей головками увеличивает усилие пултрузии и

снижает скорость процесса. Расчетные значения основных параметров процесса удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [8, 15, 18].

6. На основе результатов исследований разработан новый одностадийный процесс получения профилей из термопластичных полимеров, однонаправленно армированных волокнами. Изготовлены опытные партии профильных изделий из стеклоармированных термопластов. Замена профилями из стеклоармированных термопластов 1 т алюминиевых профилей позволяет экономить 1500-2000 долларов США [8, 11, 13-15, 20].

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Закономерности и аномалии вязкого течения анизотропных волоконистых композитов с термопластичной полимерной матрицей / В.П. Ставров, А.В. Дорожко, А.В. Марков и др. // Доклады НАН Беларуси. - 1998. - Т. 42, № 6. - С. 111-115.

2. Характеристики анизотропных композитов с термопластичной матрицей в вязкотекучем состоянии. 1. Методы определения / В.П. Ставров, А.В. Дорожко, А.В. Марков и др. // Материалы, технологии, инструменты. - 1998. - Т.3, №3. - С. 92-97.

3. Характеристики анизотропных композитов с термопластичной матрицей в вязкотекучем состоянии. 2. Влияние структуры / В.П. Ставров, А.В. Дорожко, А.В. Марков и др. // Материалы, технологии, инструменты. - 1998. - Т.3, №4. - С. 80-84.

4. Роль вязких свойств термопластичного препрега и матрицы при намотке колец / В.П. Ставров, А.В. Марков, А.В. Жерновский, К. Фридрих // Механика композитных материалов. - 2000. - Т.36, №3. - С. 419-427.

5. Механические свойства длиноволокнистого стеклонаполненного полиамида, изготовленного по пултрузионной технологии / В.П. Ставров, А.В. Дорожко, А.В. Марков и др. // Материалы, технологии, инструменты. - 2000. - Т.5, №1. - С. 36-41.

6. Effect of viscosity of a thermoplastic prepreg and matrix upon winding of rings / V.P. Stavrov, A.V. Markov, A.V. Zhernovskii, K. Friedrich // Mechanics of Composite Materials; 2000. - Vol. 36, №3, С. 249-254.

7. Ставров В.П., Ткачев В.М., Марков А.В. Силоскоростные режимы прикатки роликом однонаправленного армированного термопластичного слоя // Материалы, технологии, инструменты. - 2000. - Т.5, №3. - С. 28-31.

8. Ставров В.П., Марков А.В., Наркевич А.Л. Энергосберегающие *on-line*-технологии производства изделий из термопластов, армированных волокнами // Ресурс- и энергосберегающие технологии в химической промышленности и производстве строительных материалов: Материалы докл. межд. научно-техн. конф. / БГТУ. - Минск, 2000. - С. 96-99.

9. Ставров В.П., Кременевская Е.И., Марков А.В. Длинноволокнистые стеклонаполненные термопласты как альтернатива алюминиевым сплавам

// Разработка импортозамещающих технологий и материалов в химической промышленности: Материалы докл. Межд. научно-техн. конф. / Минск: БГТУ, 1999. - С. 97-100.

10. Марков А.В., Наркевич А.Л., Ставров В.П. Длинноволокнистые стеклонаполненные термопласты для литья под давлением и прессования // Полимерные композиты -2000: Сборник трудов межд. научно-техн. конф. / Гомель: ИММС НАНБ, 2000. - С. 117-121.

11. Ставров В.П., Зуев А.П., Марков А.В. Универсальная установка для изготовления методом пултрузии волокнистых композитов с термопластичной матрицей // Полимерные композиты 98: Тез. докл. конф. / Гомель: ИММС НАНБ, 1998. - С. 184.

12. Ставров В.П., Марков А.В., Ткачев В.М. Определение режимов формообразования изделий из армированных термопластов по характеристикам вязких свойств препрегов // Материалы, технологии, инструменты. - Т.3, №2. - Тезисы докл. конф. "НОМАТЕХ-98" / Минск, 1998. - С. 81-82.

13. Ставров В.П., Зуев А.П., Марков А.В. Конструкции из пултрузируемых волокнистых композитов с термопластичной матрицей // Современные проблемы машиноведения: Материалы межд. научно-техн. конф. - Т. 1 / Гомель: ГГТУ им. С.О.Сухого, 1998. - С.160-161.

14. Ставров В.П., Марков А.В. Одностадийная пултрузионная технология получения профилей из армированных термопластов // Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии в условиях современного рынка/ Материалы межд. конф. / Могилев: ММИ, 2000. - С. 163.

15. Марков А.В., Ставров В.П. Пултрузия профильных изделий из термопластов, армированных стеклянными волокнами // Полимерные композиты -2000: Тез. докл. конф. / Гомель: ИММС НАНБ, 2000. - С. 24-25.

16. Намотка термопластичной стеклоармированной лентой / Ставров В.П., Жерновский А.В., Кирсанов Д.А., Марков А.В. // Полимерные композиты -2000: Тез. докл. конф. / Гомель: ИММС НАНБ, 2000. - С. 23-24.

17. Марков А.В., Наркевич А.Л., Ставров В.П. Длинноволокнистые стеклонаполненные термопласты для литья под давлением и прессования // Полимерные композиты -2000: Тез. докл. конф. / Гомель: ИММС НАНБ, 2000. - С. 92-93.

18. Карпович О.И., Марков А.В., Ставров В.П. Консолидация стренг из армированных термопластов // Полимерные композиты -2000: Тез. докл. конф./ Гомель: ИММС НАНБ, 2000. - С. 93.

19. Effect of viscosity of a thermoplastic prepreg and matrix upon winding of rings // V.P. Stavrov, A.V. Markov, A.V. Zhernovskii, K.F. Friedrich // Mechanics of Composite Materials-2000: XI Int. Conf. Riga, 2000. - P. 195.

20. Пат. заявка № а20010090 ВУ, МПК6 В29С 70/52. Способ изготовления профильных изделий из термопластичных полимеров, односторонне армированных непрерывными волокнами / Ставров В.П., Марков А.В. - Заяв. 5.02.2001.

## РЕЗЮМЕ

Марков Александр Владимирович

**Течение однонаправленных термопластичных препрегов  
в процессах формообразования изделий**

*Препрег, термопластичная матрица, расплав, течение, вязкость, намотка, укладка роликом, пултрузия, профильные изделия.*

*Объект исследования* - однонаправленные препреги и волокнистые композиты с термопластичной матрицей, процессы вязкого течения препрега при намотке, укладке роликом, пултрузии. Предмет исследования - методы определения, характеристики вязкого течения препрегов, параметры технологических процессов формообразования изделий из них.

*Цель исследования* - изучение особенностей вязкого течения однонаправленных волокнистых препрегов с термопластичной матрицей в процессах формообразования изделий и выработка на этой основе рекомендаций по совершенствованию процессов и управлению их параметрами.

Установлены закономерности и выявлены аномалии поведения однонаправленных препрегов в вязкотекучем состоянии, обусловленные нелинейностью вязких свойств матричного полимера, неоднородностью и анизотропией структуры препрега, влиянием граничных условий на процесс течения. Разработаны адекватные модели вязкого течения препрега при намотке, укладке роликом и пултрузии, показана преобладающая роль сдвигов в трансверсальной плоскости.

Выведены соотношения, позволяющие рассчитать параметры процесса формообразования изделий по характеристикам вязких свойств матричного полимера и препрега, оптимизировать технологические режимы получения изделий.

Разработана одностадийная технология получения профильных изделий из термопластичных полимеров, однонаправленно армированных стеклоровингом (площадь сечения профиля до 100 мм<sup>2</sup>, степень наполнения до 30 об. %, скорость до 5 см/с).

На универсальной пултрузионной установке в БГТУ выпущены опытные партии профильных изделий из полиамида-6 и полипропилена, армированных стеклоровингом. Стеклоармированные профили внедрены в качестве раскладок для крепления панелей в салонах трамвайных вагонов и в качестве штанг-держателей сепараторов зерноочистительных машин. Использование 1 т стеклоармированных профилей из термопластов взамен алюминиевых дает экономию 1500-2000 долларов США.

## РЭЗІЮМЭ

Маркаў Аляксандр Уладзіміравіч  
**Цячэнне аднаакіраваных тэрмапластычных прапрэгаў  
 у працэсах формаўтварэння вырабаў**

*Прапрэг, тэрмапластычная матрыца, расплаў, цячэнне, вязкасць, намотка, укладка ролікам, пултрузія, профільныя вырабы.*

*Аб'ект даследавання* - аднаакіраваныя прапрэгі і валакністыя кампазіты з тэрмапластычнай матрыцай, працэсы вязкага цячэння прапрэгу пры намотцы, укладцы ролікам, пултрузіі. Прадмет даследавання - метады вызначэння, характарыстыкі вязкага цячэння прапрэгаў, параметры тэхналагічных працэсаў формаўтварэння вырабаў з іх.

*Мэта даследавання* - вывучэнне асаблівасцей вязкага цячэння аднаакіраваных валакністых прапрэгаў з тэрмапластычнай матрыцай у працэсах формаўтварэння вырабаў і выпрацоўка на гэтай аснове рэкамендацый па удасканалванню працэсаў і кіраванню іх параметрамі.

Устаноўлены заканамернасці і выяўлены аномаліі паводзін аднаакіраваных прапрэгаў у вязкаакучым стане, якія абумоўлены нелінейнасцю вязкіх уласцівасцей матрычнага палімеру, неаднароднасцю і анізатрапіяй структуры прапрэгу, ушывам межавых умоў на працэс цячэння. Распрацаваны адэкватныя мадэлі вязкага цячэння прапрэгу пры намотцы, укладцы ролікам і пултрузіі, паказана пераважная роля зрухаў у трансверсальнай плоскасці.

Выведзены суадносіны, якія дазваляюць разлічыць параметры працэсу формаўтварэння вырабаў па характарыстыках вязкіх уласцівасцей матрычнага палімеру і прапрэгу, аптымізаваць тэхналагічныя рэжымы атрымання вырабаў.

Распрацавана аднастадынная тэхналогія атрымання профільных вырабаў з тэрмапластычных палімераў, аднаакіравана арміраваных шклоармінгам (плошча сячэння профілю да  $100 \text{ мм}^2$ , ступень напынення да 30 аб. %, хуткасць да  $5 \text{ см/с}$ ).

На універсальнай пултрузійнай устаноўцы ў БДТУ выпушчаны доследныя партыі профільных вырабаў з поліаміду-6 і поліпрапілену, якія арміраваўшы шклоармінгам. Шклоарміраваныя профілі ўкаранены ў якасці раскладак для ўмацавання панэляў у салонах трамвайных вагонаў і ў якасці штанг-трымальнікаў сепаратараў зернеачышчальных машын. Выкарыстанне 1 т шклоарміраваных профіляў з тэрмапластаў узамен алюмініевых дае эканомію 1500-2000 долараў ЗША.

## SUMMARY

Markov Alexander

**Flow of unidirectional thermoplastics prepregs  
in the processes of forming products***Prepreg, thermoplastic matrix, melt, flow, viscosity,  
winding, roller compaction, pultrusion, profiles.*

*Object of research* is the unidirectional prepregs and fiber composite with thermoplastic matrix, processes of viscous flow by winding, roller compaction, pultrusion. Subject of research is the methods of a determine, characteristics of a viscous flow of the prepregs, parameters of technology processes of products forming from it.

*Aim of research* is the creation of theory bases for processes of products forming from unidirectional fibre prepregs with thermoplastic matrix.

Some laws have been set and appeared anomalies of a behavior unidirectional prepregs in the viscous flow condition worded non-linearity of viscous properties of the matrix polymer, non-equability and anisotropy structure of the prepreg, effect the limit condition at a process of a flow. Adequate models of the viscous flow of the prepreg was developed by winding, roller compaction, pultrusion showed prevail role of the shifts in transverse surface.

The balances allowed to calculate were led out the parameters of the process of the products forming to characteristic viscous properties of the matrix polymer and prepreg to optimisation technology regimes of the products receiving.

On-line technology for profiles receiving from thermoplastic, unidirectional reinforced glass roving polymers (cross-sectional square of the profile up  $100 \text{ mm}^2$ , the degree of reinforcement up 30 vol.%, the speed up 5sm/s) has been developed.

On universal pultrusion unit in BSTU were produced experimental parts of the profiles from reinforced glass roving. Profiles have found application as elements for binding of the panels in transalons and as bars of the separators graincleaning machines. Utilizing 1 t glass reinforced profiles with thermoplastic matrix instead of aluminium saves up to 1500-2000 US\$.

Марков Александр Владимирович

**ТЕЧЕНИЕ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ  
ПРЕПРЕГОВ В ПРОЦЕССАХ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ**

Подписано в печать 21.04.2001. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.

Усл.печ.л.1,5. Усл.кр.-отт. 1,5. Уч.-изд.л.1,3.

Тираж 80 экз. Заказ *154*.

Белорусский государственный технологический университет.  
Лицензия ЛВ №276 от 15.04.98. 220050, г.Минск, ул.Свердлова, 13а.

Отпечатано на ротапринте Белорусского государственного  
технологического университета. 220050, г.Минск, ул.Свердлова, 13.