

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 678.073:678.027:539.4

НАРКЕВИЧ
Анна Леонидовна

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
СТЕКЛОВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ
С ТЕРМОПЛАСТИЧНОЙ МАТРИЦЕЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПУЛТРУЗИИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.01 – Материаловедение
(химическая промышленность)

Минск 2009

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

Научный руководитель

Ставров Василий Петрович,
доктор технических наук, профессор,
УО «Белорусский государственный
технологический университет», кафедра
механики материалов и конструкций

Официальные оппоненты:

Свириденко Анатолий Иванович,
доктор технических наук,
академик НАН Беларуси,
зав. лабораторией НИЦ проблем
ресурсосбережения НАН Беларуси;

Можейко Юрий Михайлович,
кандидат технических наук,
начальник центральной исследовательской
лаборатории ОАО «Могилевхимволокно»

Оппонирующая организация


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

Защита состоится 2 февраля 2010 г. в 14.00 на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.08.04 при УО «Белорусский государственный технологический университет» (Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а) в аудитории 240, корп. 4. Тел. (8-017) 227-51-71; факс (8-017) 227-62-17; электронная почта: root@bstu/unibel.by/

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

Автореферат разослан 29 декабря 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук



Толкач О.Я.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Благодаря экологическим преимуществам перед реактопластами, выгодному соотношению стоимости, технологических и эксплуатационных свойств, термопластичные полимеры находят все более широкое применение в транспортном и химическом машиностроении, в строительстве и других отраслях техники. В Республике Беларусь имеются условия для производства стеклоармированных термопластов, способных конкурировать с традиционными конструкционными материалами. В то же время объемы применения высокопрочных изделий из армированных термопластов еще существенно уступают уровню, достигнутому в технологически развитых странах.

Армирующий эффект от введения в полимеры высокопрочных волокон в наибольшей мере реализуется в случае создания однонаправленной структуры, соответствующей полю растягивающих напряжений в элементах конструкции, в частности, при совмещении армирующего волокнистого наполнителя с полимерным расплавом и формообразовании изделий методом пултрузии. Однако закономерности структурообразования в связи с геометрией изделия, смещением натянутых волокон в вязкой матрице, как и возможности получения изделий с неоднородной структурой, отличающейся от однонаправленной и наиболее соответствующей напряженному состоянию материала в условиях эксплуатации, изучены недостаточно.

Решение перечисленных задач позволит снизить материалоемкость изделий, повысить производительность получения и конкурентоспособность армированных термопластов и изделий из них, расширить области применения в изделиях конструкционного назначения термопластичных полимеров, удовлетворяющих повышенным экологическим требованиям.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами. Диссертация относится к приоритетному направлению научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2006–2010 годы «Ресурсосберегающие и энергоэффективные технологии производства конкурентоспособной продукции» (обеспечение высокого экологического уровня готовой продукции), утвержденному Указом Президента Республики Беларусь от 6 июля 2005 г. № 315, и к приоритетному направлению прикладных научных исследований на 2006–2010 годы «Новые ресурсосберегающие и биосферносовместимые технологии и материалы» согласно Перечню, утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17 мая 2005 г. № 512.

Исследования по теме диссертации начаты в связи с выполнением проекта INNOCOMPO по международной программе Inco-Copernicus, финансируемой Европейской комиссией (контракт № IC15-CT96-0738, 1997–1999 гг.), выполнялись затем по заданию Минобразования Республики Беларусь «Технети-

1328 ah

Беларускага дзяржаўнага
навуковага ўніверсітэта

ческие основы процессов формообразования изделий из термопластичных полимеров, армированных длинными волокнами» (№ гос. регистрации 2000930, 2000–2001 гг.); по заданию 4.13 ГПОФИ «Материал» (№ 20040822, 2004–2005 гг.) и заданию 1.29 «Разработка технологических основ структуро- и формообразования изделий из смешанных вторичных термопластов и композиций на их основе» ГПИИ «Полимерные материалы и технологии» (№ 20062706, 2006–2009 гг.).

Цель исследования – повышение эффективности и расширение области применения высокопрочных композиционных материалов на основе термопластичных полимеров, в том числе вторичных, в изделиях конструкционного назначения, получаемых с использованием гибких энерго- и ресурсосберегающих пултрузионных технологий.

Для достижения этой цели поставлены **следующие основные задачи**:

1. Изучить влияние натяжения волокон, вязкости полимерного расплава и других технологических факторов на микро- и макроструктуру и свойства армированных термопластов, получаемых пултрузией, разработать на этой основе рекомендации по управлению структурой и свойствами материала в изделиях.

2. Установить количественные характеристики влияния ориентации армирующих волокон, вязкости и структурных превращений полимерной матрицы на свойства материала в изделиях, получаемых литьем под давлением, пресованием и экструзией из длиноволокнистых гранулированных материалов, изготавливаемых пултрузионной пропиткой стекловолокна, и возможности управления структурой и свойствами материала в таких изделиях.

3. Установить закономерности формирования структуры и свойств однонаправленно армированных термопластов при совмещенных стадиях пултрузионной пропитки и формообразования профильных изделий и возможности расширения номенклатуры изделий и повышения производительности процессов их получения.

4. Выяснить особенности формирования по совмещенной пултрузионно-экструзионной технологии неоднородных по сечению (гибридных) структур армированных термопластов в профильных изделиях и эффективность их применения для снижения материалоемкости изделий.

Объект исследования – термопластичные полимеры, в том числе вторичные, армированные стеклянными волокнами, получаемые по пултрузионной технологии, и изделия из стеклоармированных термопластов.

Выбор объекта исследования обусловлен возможностью получения конкурентоспособных по экологическим и экономическим критериям изделий конструкционного назначения за счет направленного армирования термопластичных полимеров высокопрочными стеклянными волокнами.

Предмет исследования – параметры микро- и макроструктуры, характеристики свойств армированных термопластов и изделий, параметры процессов структурообразования материала и формообразования изделий.

Положения, выносимые на защиту.

Влияние вязкости расплава и натяжения волокон на степень наполнения и однородность микроструктуры армированных термопластов, получаемых пултрузионной пропиткой однонаправленного волокнистого слоя полимерным расплавом. Способ получения материала, позволяющий повысить производительность пропитки, степень наполнения и однородность композиций.

Закономерности влияния вязкости расплава и структурных превращений матричного полимера, длины и ориентации волокон на свойства длиноволокнистых литевых и прессовочных композиций, получаемых по пултрузионной технологии, в изделиях. Модели структуры и свойств материала, позволяющие повысить конкурентоспособность изделий за счет достижения более высоких показателей удельной жесткости и прочности материала в изделиях.

Влияние режимов охлаждения стренг, профилей и литевых изделий на кристаллизацию вторичного полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и на свойства стеклонаполненных композиций и изделий на основе ПЭТФ и метод, позволяющий оптимизировать режимы охлаждения изделий по критериям прочности материала.

Закономерности трансформации структуры в результате вязкого течения полимерного расплава под действием натяжения стренг при одностадийной пултрузии профильных изделий и основанные на них условия достижения более высокой производительности процесса при использовании полимеров с высокой вязкостью расплава.

Методы формирования гибридной структуры профильных изделий, получаемых по двухстадийной или одностадийной пултрузионной технологиям и нагружаемых в условиях эксплуатации изгибающими и крутящими моментами, обеспечивающие снижение массы изделий в 2–3 раза.

Отработанные конструктивные и технологические решения, позволяющие повысить гибкость пултрузионной технологии, увеличить номенклатуру изделий и за счет этого расширить области экономически эффективного применения термопластичных полимеров крупнотоннажного производства в изделиях конструкционного назначения.

Личный вклад соискателя. С участием соискателя на основе анализа источников информации поставлены задачи исследования. Соискателем выполнены исследования структуры и свойств материалов, параметров процессов и изделий, обработаны и проанализированы их результаты, подготовлены публикации и доложены результаты исследований. С его участием созданы и заявлены для патентования новые технические решения, подготовлены проекты технической документации, изготовлены образцы и выпущены опытные партии материалов и изделий.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований докладывались на ежегодных научно-технических конференциях БГТУ в 1996, 2000–2009 годах; на международных научно-технических конференциях: «Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии» (Гродно, 1996); «Передовые

технологии в производстве материалов и восстановлении изношенных поверхностей» (Минск, 1997); «Полимерные композиты» (Гомель, 2000 и 2003); «Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической промышленности и производстве строительных материалов» (Минск, 2000); «Новые технологии рециклинга вторичных ресурсов» (Минск, 2001); «Аэрокосмическая техника и высокие технологии» (Пермь, 2002); «Современные технологии, материалы, машины и оборудование» (Могилев, 2002); «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии» (Гродно, 2002 и 2005); «Современные проблемы машиноведения» (Гомель, 2002 и 2004); «Новые технологии в химической промышленности» (Минск, 2002); «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» (Новополоцк, 2003); «Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы их развития» (Минск, 2005 и 2009); «Поликомтриб» (Гомель, 2005 и 2009); «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 2007); «Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления» (Минск, 2008); «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (Минск, 2008); «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, 2009); на международных симпозиумах: «Symposium mechaniki zniszczenia materialów i konstrukcji» (Августов, Польша, 2001 и 2007); «Comp 03: International symposium on Advanced Composites» (Корфу, Греция, 2003).

Опубликованность результатов. Результаты исследований изложены в 38 печатных работах, из них 8 статей в научных и научно-технических журналах (3,9 авт. листа), 16 статей в материалах конференций и 14 тезисов докладов на научно-технических конференциях. Новые технические решения изложены в 7 заявках на патенты Республики Беларусь на изобретения и полезные модели (получен патент на изобретение и 2 патента на полезную модель). Общий объем публикаций 9,1 авт. листа.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает введение, общую характеристику работы, пять глав основной части, заключение, библиографический список и приложения. Общий объем диссертации 232 с., включая 84 иллюстрации и 27 таблиц на 47 с., приложения на 62 с. и список литературы из 213 источников, в их числе 46 публикаций автора, на 23 с.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 проанализированы литературные источники, в которых исследуются структура, технологические и эксплуатационные свойства армированных термопластов (АТ). Отмечено, что пултрузионная технология получения материалов и формообразования изделий из АТ, относящаяся к «высоким» технологиям, все шире используется в технологически развитых странах для производства высокопрочных изделий в различных отраслях техники, являющихся также приоритетными в Республике Беларусь. Показано, что конкурентоспособность изделий из АТ на отечественном рынке может быть повышена за счет оп-

тимального армирования непрерывными и длинными, а также относительно дешевыми и высокопрочными стеклянными волокнами, применения в качестве матриц термопластичных полимеров, производимых в Республике Беларусь, в том числе отходов производства и смесей полимеров, и за счет гибкости технологии как в отношении матричных полимеров, так и в отношении получаемых изделий. Высокая удельная жесткость и прочность изделий, получаемых по двухстадийному или по одностадийному варианту технологии, включающей пулгтрузионную пропитку волокнистого наполнителя полимерным расплавом, обеспечивается за счет формирования однородной на микроуровне и неоднородной на макроуровне (гибридной) структуры материала в изделии, согласования технологических режимов на каждой стадии с учетом особенностей структурообразования. В то же время, особенности структуры и свойств АТ, позволяющие реализовать данные возможности, изучены недостаточно.

На основании анализа литературных источников сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе дана характеристика применяемых компонентов, пулгтрузионной технологии получения АТ и изделий, а также методов исследования структуры и свойств материалов, показателей качества изделий.

В качестве матричных полимеров использовали термопластичные полимеры, производимые в Республике Беларусь, – полиамид-6 (ПА-6), ПЭТФ, полибутилентерефталат (ПБТ), полиэтилен высокого давления (ПЭВД), а также полипропилен (ПП) (РФ) и вторичные полимеры, их смеси, в качестве наполнителей – стекловолокна марок ЕС10-2400, ЕС13-2400-30А, ЕС13-2400Н-54С ТУ РБ 300059047.051-2003, производимые ОАО «Полоцк-стекловолокно».

Температурные превращения полимеров исследовали с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии. Вязкость полимерных расплавов оценивали по показателю текучести расплава (ГОСТ 11645-73). Параметры степенного закона течения полимерных расплавов находили по методу деформирования диска между плоскопараллельными плитами.

АТ и профильные изделия получали на универсальной пулгтрузионной установке на базе червячного экструдера ЧП32×25. Установка оснащена шпуляриком с регулируемым натяжением ровинга, пропитывающей головкой оригинальной конструкции с отклоняющими и калибрующими элементами, а также формообразующими, тянущим и режущим устройствами. Установка позволяет получать 8 стренг из стекловолокна с линейной плотностью 2400–5000 текс (или профильные изделия соответствующего сечения) с производительностью до 25 кг/ч в зависимости от вязкости полимерного расплава.

Производительность пропитки волокнистого слоя полимерным расплавом оценивали с помощью безразмерного критерия $I_p = (\mu h_0 b R / F)^s v / d^{1+s}$, где $s = 1/n$; μ и n – коэффициент консистенции и показатель степени в законе течения расплава; h_0 и b – толщина и ширина пропитанного слоя; R – радиус отклоняющего элемента; F – натяжение слоя; v – скорость перемещения слоя; d – средний диаметр волокон.

Процесс пропитки волокнистого слоя нелинейно-вязким полимерным расплавом моделировали с использованием программы IMPREG. Качество пропитки оценивали по степени заполнения слоя полимером и показателям однородности получаемой структуры.

Параметры технологического процесса, показатели технологических и эксплуатационных свойств материалов определяли с помощью технических средств, оснащенных преобразователями усилия, перемещения и температуры, подключенными к ПЭВМ через АЦП типа ADAM, и программных средств обработки результатов, обеспечивающих регистрацию измеряемых величин, построение уравнений регрессии и оценку погрешностей измерения. Погрешности задания температуры не более $\pm 5^{\circ}\text{C}$, измерения температуры – $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, погрешности измерения усилий и перемещений – $\pm 1\%$.

Структуру армированных термопластов в образцах и изделиях анализировали с помощью растрового электронного и оптических микроскопов, а также путем анализа волокнистого каркаса после выжигания матричного полимера. Находили числовые характеристики и законы распределения длины волокон и углов, задающих их пространственную ориентацию в изделиях.

Снижение прочности стеклонаполненного ПЭТФ в результате кристаллизации полимера оценивали путем измерения микротвердости на приборе ПМТ-3М (в НИЦ ПР НАН Беларуси, Гродно), а также путем испытания микрообразцов, вырезанных из стандартных образцов для испытаний на изгиб.

Технико-экономические показатели материалов различной структуры сравнивали по стоимости единиц удельной жесткости и прочности.

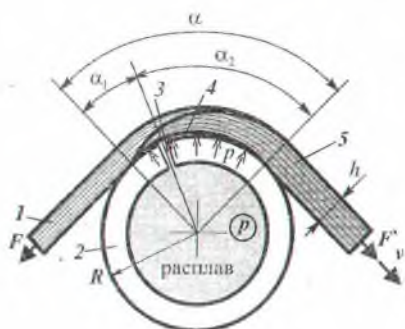
В третьей главе изложены результаты исследования структуры и свойств АТ, получаемых по двухстадийной технологии, – однонаправленно армированных, длиноволокнистых литьевых (ДЛМ) и прессовочных (ПМ) материалов, а также материалов гибридной структуры в изделиях, получаемых по комбинированной экструзионно-пултрузионной технологии.

По результатам компьютерного моделирования пултрузионной пропитки натянутого волокнистого слоя на цилиндрическом отклоняющем элементе расплавом, подаваемым через щель (рисунок 1), установлено, что с увеличением вязкости полимерного расплава снижается степень наполнения слоя армирующими волокнами и возрастает неоднородность микроструктуры получаемого полуфабриката АТ (рисунок 2).

Увеличение натяжения слоя в сочетании с подачей расплава по предложенному способу позволяет повысить степень наполнения и однородность композиции при пропитке высоковязкими полимерными расплавами. Безразмерный критерий производительности пропитки I_p почти на порядок превышает значения, реализованные в исследованиях зарубежных авторов.

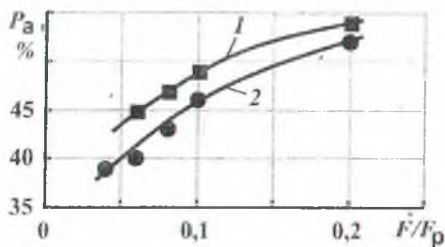
Экспериментально определены характеристики упругих, вязкоупругих свойств и прочности термопластичных полимеров, однонаправленно армированных стекловолокном. Установлены особенности механических свойств од-

нонаправленных АТ, полученных из полимеров крупнотоннажного производства (ПП, ПА-6, ПЭТФ, ПБТ), в том числе вторичных.



- 1 - волокнистый слой;
- 2 - отклоняющий элемент; 3 - щель;
- 4 - прослойка расплава;
- 5 - пропитанный слой

**Рисунок 1 - Схема пропитки
волокнистого слоя
на отклоняющем элементе**



1 - $400 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,75}$, 2 - $1600 \text{ Па} \cdot \text{с}^{0,75}$

**Рисунок 2 - Зависимость степени
наполнения стеклоровинга
расплавом ПА-6**

**от отношения усилия натяжения слоя
к прочности стеклоровинга
и коэффициента консистенции расплава**

Модули Юнга и разрушающие напряжения при растяжении вдоль направления армирования возрастают пропорционально объемной доле стекловолокон. ПЭТФ, однонаправленно армированный стеклоровингом, имеет более совершенные упругие свойства при изгибе, чем стеклонаполненный вторичный ПА-6 аналогичной структуры. Неоднородное распределение армирующих волокон в трансверсальном сечении, наблюдаемое при пултрusionной пропитке высоковязкими расплавами, служит причиной снижения как модуля упругости, так и прочности при растяжении в этой плоскости. На основании этих закономерностей предложены соотношения, пригодные для оценки деформационных и прочностных свойств однонаправленных АТ по свойствам компонентов и их объемной доле, которые могут быть использованы при разработке конструкции и технологии изготовления изделий.

В диапазоне концентраций стекловолокна до 50 мас. % наблюдается положительная корреляция характеристик жесткости и прочности ДЛМ со степенью наполнения стекловолокном и с механическими свойствами матричного полимера. С увеличением вязкости расплава матричного полимера экстремум прочности ДЛМ смещается в область более низких степеней наполнения. При изгибе и сжатии роль матрицы выше, чем при срезе, меньше и оптимальная степень наполнения.

В результате анализа условий охлаждения и кристаллизации ПЭТФ в образцах, получаемых пултрusionей и литьем под давлением стеклонаполненных композиций, измерений микротвердости преимущественно аморфных поверхностных и более закристаллизованных внутренних областей (рисунок 3), пред-

ложена методика, позволяющая по известным параметрам структуры находить режимы охлаждения стренг и изделий, обеспечивающие более высокую прочность материала.

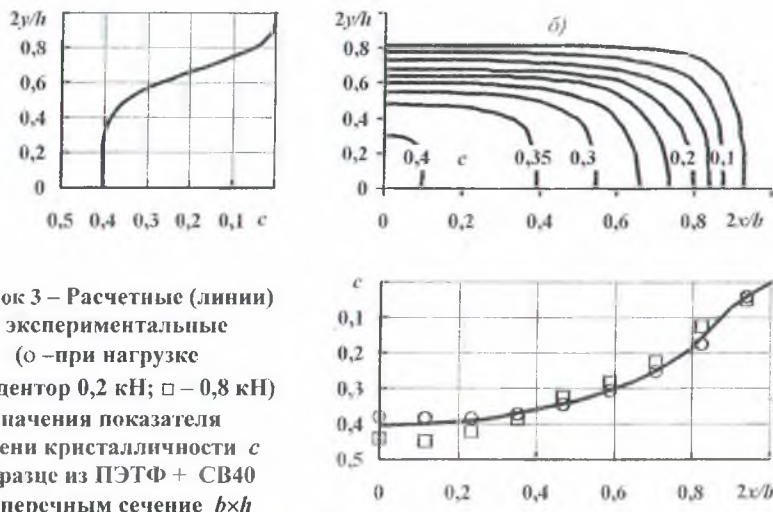
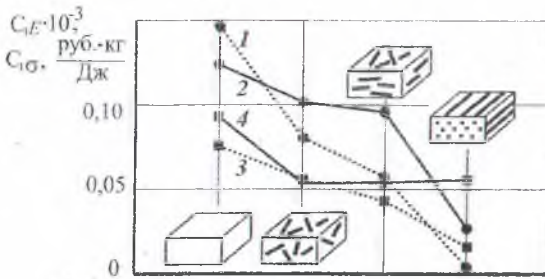


Рисунок 3 – Расчетные (линии) и экспериментальные (○ – при нагрузке на индентор 0,2 кН; □ – 0,8 кН) значения показателя степени кристалличности c в образце из ПЭТФ + СВ40 с поперечным сечением $b \times h$

«Щадящие» режимы пластикации и выпрыска – повышенные температуры расплава, пониженные частоты вращения шнека, увеличенные размеры литниковых отверстий и другие приемы, снижающие повреждение армирующих волокон, – обеспечивают более высокую прочность изделий из ДЛМ. Средняя длина волокон в образцах, получаемых из ДЛМ методом литья под давлением, в 5–6 раз меньше, чем в гранулах, но на порядок больше, чем в образцах из коротковолокнистых литевых композиций, получаемых по традиционной технологии (экструзией). При равных степенях наполнения прочность в изделиях из ДЛМ выше на (20–25)%, а из ПМ с гранулами длиной (30–50) мм – на (30–50)%.

Статистическая модель структуры в изделиях из ДЛМ построена на основе анализа распределения по ориентациям в пространстве однонаправленных элементов – гранул исходной композиции. С учетом ориентации элементов и их разрушения в зависимости от ориентации методом осреднения получены количественные характеристики процесса деформирования АТ, пригодные для прогнозирования жесткости и прочности материала в изделиях.

Стоимость единицы удельной жесткости и прочности однонаправленных элементов из АТ, получаемых по пултрузионной технологии и нагруженных в условиях эксплуатации изделия растягивающими напряжениями, в 5–10 раз меньше стоимости тех же показателей в элементах, получаемых из полимера, хаотически наполненного короткими стеклянными волокнами (рисунок 4).



1 и 3 – удельная жесткость; 2 и 4 – прочность
1 и 2 – растяжение, 3 и 4 – сжатие

Рисунок 4 – Зависимость технико-экономических показателей стеклонаполненного ПП в изделиях от структуры и напряженного состояния

элементами, получаемыми пултрузией, и нагружаемых в условиях эксплуатации изгибающим моментом (рисунок 6). Масса единицы длины профиля из АТ гибридной структуры в 1,5–2 раза меньше массы профиля однородной структуры из тех же компонентов.

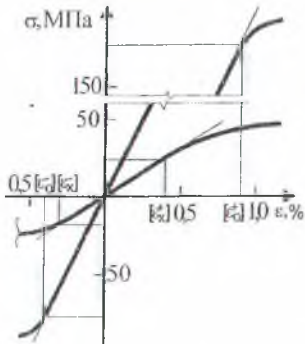


Рисунок 5 – Диаграммы деформирования

Предложена двухстадийная технология изготовления гибридного профиля, включающая консолидацию однонаправленных стренг и пластицированной длинноволокнистой композиции в экструзионной головке. Она пригодна для матриц с высокой вязкостью расплава, в том числе вторичных. Сформулированы условия консолидации частей профиля и снижения уровня термоструктурных напряжений и деформаций при формировании гибридных структур.

Четвертая глава посвящена изучению структуры и свойств АТ в профильных изделиях, получаемых методом одностадийной пултрузии. Процесс включает пропитку непрерывного волокнистого наполнителя расплавом матричного полимера с формированием стренг или лент на выходе из пропиточной

Типичные диаграммы деформирования при растяжении и сжатии ПП (кашлен), однонаправленно (60 мас. %) и хаотически (40 мас. %) армированного стекловолокном ЕС13–2400, показаны на рисунке 5. На основании этих диаграмм по критерию минимума стоимости единиц удельной жесткости и прочности определены параметры сечения стержней из АТ гибридной структуры, армированных однонаправленными

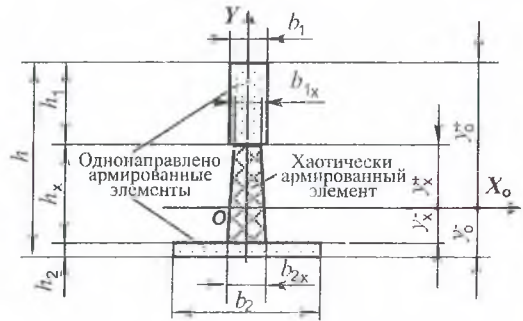


Рисунок 6 – Параметры сечения профиля

головки, консолидацию этих стренг и лент и последующее формирование из них профильного изделия на одной установке, т.е. без дополнительного теплового воздействия на материал. К параметрам процесса, единым для всех его этапов, относятся скорость протягивания волокнистого слоя и пултрудируемого изделия и натяжение (тянущее усилие).

Зависимость между тянущим усилием F и скоростью пултрузии v на различных стадиях процесса принята в виде степенной функции, аналогичной закону течения расплава матричного полимера:

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

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

Путем компьютерного моделирования (с помощью программы IMPREG) исследовано изменение структуры профилей в результате течения полимерного расплава под действием натяжения стренг (рисунки 7 и 8).



Рисунок 7 – Микрошлиф профиля, полученного пултрузией



1 – армирующий элемент; 2 – матрица
Рисунок 8 – Поперечное сечение стержня

Вычислены возможные смещения нейтральной оси сечения, изменения за счет этого моментов инерции и жесткости профиля. Результаты расчета подтверждены экспериментами.

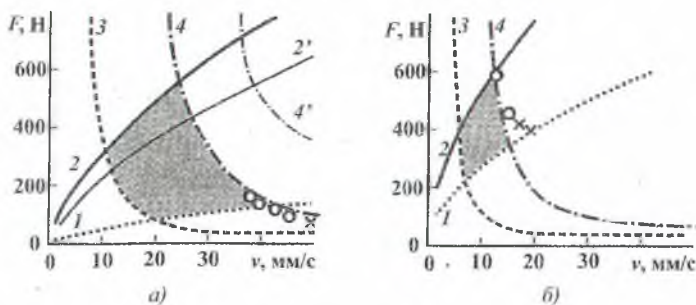
Установлено, что трансформация структуры ЛТ по одностадийной технологии оказывает существенное влияние на характеристики жесткости и прочности и на остаточную кривизну профилей. Разрушение при изгибе происходит преимущественно в результате потери устойчивости пучков волокон, лежащих вблизи наружного контура сжатой зоны.

Соотношение между натяжением стренг F_f и скоростью пултрузии v , при которых происходит заданное смещение Δ_y нейтральной оси сечения, выведено из уравнения фильтрации полимерного расплава при температуре T :

$$F_f(v) = \mathbf{M}(T, v) R_f^{1-n} A_f \left[(\Delta'_y v) / (K_{fe} \alpha_f) \right]^n,$$

где R_f – радиус формообразующей поверхности; A_f – площадь сечения профиля; K_{fe} – коэффициент фильтрации расплава; α_f – угол обхвата.

Составлена система уравнений, связывающих натяжение ровингов и скорость пултрузии профилей и задающих «окно» процесса – область режимов, обеспечивающих получение изделий с заданными параметрами структуры (линии и темные области на рисунке 9).



1 – пропитка; 2 – образование достаточной прослойки полимера; 3 – консолидация;
4 – смещение наполнителя

Рисунок 9 – Границы режимов одностадийной пултрузии профилей из стеклоармированного ПА-6 (а) и ПП (б)

При значениях параметров, выбранных в области «окна» процесса (показаны точками), получено удовлетворительное, а вне этой области (показаны крестиками) – неудовлетворительное качество профиля в экспериментах. Наибольшей производительности, гарантирующей качество профиля, соответствует довольно узкая область допустимых натяжений ровингов. Увеличение вязкости матричного полимера в зонах пропитки и консолидации приводит к смещению оптимальных усилий натяжения в область более высоких значений, но мало влияет на допустимую скорость пултрузии. Для обеспечения максимальных скоростей пултрузии требуется точное поддержание натяжения ровингов. С этой целью разработано и использовалось в экспериментах устройство для размотки ровинга с постоянным натяжением.

На основе установленных закономерностей сформулированы условия согласования параметров одностадийной пултрузии профильных (стержневых) изделий из АТ гибридной структуры. Предложен способ пултрузии стержней, по которому расплав матричного полимера в количестве, необходимом для получения изделия, подают в зону пропитки пучков непрерывных волокон под давлением, достаточным для полной пропитки, а избыток его, сверх количества, необходимого для пропитки пучков непрерывных волокон, отводят в зону совмещения с дискретными волокнами по каналам, коэффициент сопротивления которых равен $k_2 = k_1 A_1 P_1 / A_2 P_2$, где k_1 – коэффициент сопротивления пропитываемого пучка непрерывных волокон; A_1 и A_2 – площади сечения матричного полимера в частях стержня, армированных непрерывными и дискретными волокнами соответственно; $P_1 = A_1 / (A_2 + A_1)$ и $P_2 = A_2 / (A_2 + A_1)$ – объемные доли полимера в этих частях (рисунок 10).

При пропитке волокнистого слоя по схеме на рисунке 1, коэффициент сопротивления пропитываемого пучка непрерывных волокон k_1 задают согласно формуле

$$k_1 = \frac{A_1 P_1 (1+n) K_c \alpha R}{n h^{(1+n)/n}}$$

где h – толщина пропитанного слоя; K_c – эффективный коэффициент проницаемости слоя непрерывных волокон; α – угол обхвата отклоняющего элемента пропитываемым слоем.

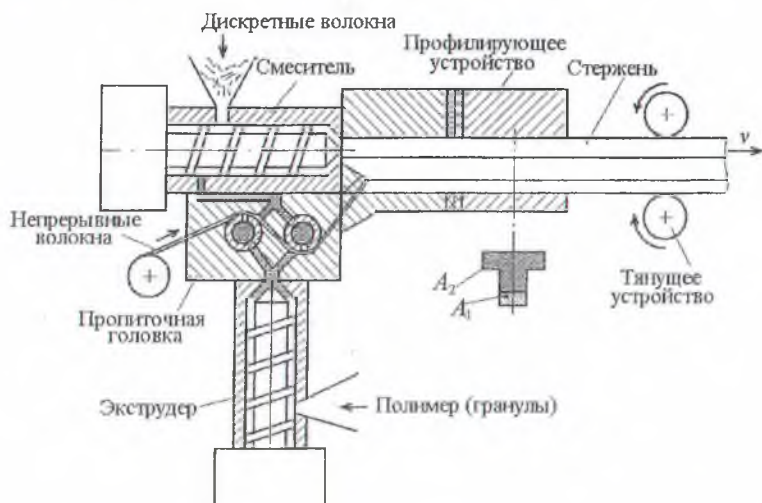


Рисунок 10 – Схема изготовления профиля гибридной структуры

Расчеты и испытания профильных изделий из АТ гибридной структуры показали, что их масса при заданных равных нагрузках и прогибах в 2–10 раз меньше массы изделий с однородной структурой. Касательные напряжения и сдвиги незначительно влияют на жесткость и прочность при изгибе стержней, структура которых рассчитана по критерию допустимых деформаций. Однонаправленное армирование по периферии сечения позволяет повысить жесткость и прочность стержней, нагружаемых крутящим моментом, в 2–3 раза.

В пятой главе приведены примеры и даны оценки эффективности применения результатов исследования на основании проработки конструкции изделий, технологии изготовления и средств технологического оснащения, выполненные по заявкам заинтересованных предприятий Республики Беларусь.

Показано, что эффективность освоения производства изделий из АТ с использованием разработанных в результате исследований вариантов пултрузионной технологии, обеспечивается за счет низкой стоимости единиц удельной жесткости и прочности однонаправленно армированного и длинноволокнистого материалов, высокой производительности и гибкости технологии, за счет применения относительно дешевых термопластов, в том числе вторичных, и возможности последующей утилизации изделий.

Разработаны технологические регламенты на получение литевых и пресовочных композиций, технические условия на типовые изделия, технологические инструкции на процессы их изготовления, проработаны технико-экономические обоснования освоения производства новых материалов и изде-

лий, получаемых из армированных термопластов с использованием пултрузионной технологии (приведены в приложениях к диссертации).

ДЛМ и ПМ из термопластичных полимеров крупнотоннажного производства, в том числе вторичных, армированных стеклянными волокнами, не уступают по технико-экономическим показателям зарубежным аналогам. В ООО «Полимер-механика» изготовлена пултрузионная пропиточная головка, обеспечивающая изготовление в промышленных условиях до 100 т в год материала ПА-6-ДС.

Однонаправленно армированные ленты на основе ГПП, получаемые методом пултрузии, использовались для стержней, профилей и труб гибридной структуры, получаемых по комбинированной экструзионно-пултрузионной технологии. Во многих условиях применения профили из стеклоармированных ПА-6 и ПЭТФ, в том числе вторичных, по технико-экономическим показателям превосходят профили из алюминиевых сплавов и неармированных термопластов, при этом пултрузионная технология обладает достаточной гибкостью в отношении выбора матричного полимера.

Показана возможность получения стержней арматурного профиля для бстонных плит несответственного назначения (ограждения, настилы и т.п.), криволинейных стержневых изделий (например, натяжных изоляторов и т.п.).

Обобщенные сведения о проработке конструкции изделий из АТ с использованием результатов проведенного исследования структуры и свойств материалов, получаемых по пултрузионной технологии, об изготовлении и испытаниях экспериментальных образцов материалов и изделий и опробовании их в опытно-промышленных условиях приведены в таблице.

Таблица – Сведения об использовании результатов исследования

Материал, изделие, полимер	Стадия разработки и освоения	Заказчик	Объем опытной партии. Срок окупаемости
ДЛМ (ПА-6)	ТУ на материал Опытные партии ДЛМ и изделий Образцы изделий КД на пропиточную головку (100 т/год), опытный образец	ФГУП «Уралтрансман» РУП «Термопласт» ООО «Полимермеханика»	1 т материала 217 изделий 6 месяцев
ПМ (ПА-6) Крышка клананная Опора напольная	Опытная партия Образцы изделий Образцы, КД на пресс-форму	РУП «Мипский моторный завод» ОАО «Белкоммунмаш» РУП «Неман» (Лида)	50 кг
ДЛМ ПЭТФ-ДС40 Втулка изолирующая	ТУ на материал Опытная партия изделий Проект ТЭО производства 50 т/год	ОАО «Могилев химволокно»	50 шт. 6 месяцев

Продолжение

Материал, изделие, полимер	Стадия разработки и освоения	Заказчик	Объем опытной партии. Срок окупаемости
ПП-ленты Кольца Трубчатые стержни и трубы Профиль	ТУ на изделия Опытная партия Экспериментальные образцы Экспериментальные образцы	УП «Автобелтрейд» НИЦ ПР НАНБ РУП «Осиповичский завод автомобильных агрегатов»	400 изделий 6 месяцев
Профили Раскладка Стержни арматурные Стержни гибридные (ПЭТФ вторичный)	ТУ на изделия Экспериментальные образцы Экспериментальные образцы, проект ТЭО производства 50 т/год	ОАО «Белкоммунмаш» Rueland Kunststofftechnik GmbH ООО «Поликонта» «Борисовский завод пластмассовых изделий»	8 месяцев
Изолятор натяжной (ПБТ)	Макеты изделия Проект ТЭО производства 50 т/год	ОАО «Могилев химволокно»	6 месяцев

Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что благодаря проведенным исследованиям достигнута высокая гибкость технологии в отношении термопластичных матричных полимеров и изделий, получаемых методом пултрузии, а технико-экономическая эффективность может быть обеспечена в случае освоения промышленного производства конкурентоспособных изделий различного назначения для отраслей экономики, относящихся к приоритетным в Республике Беларусь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Основные научные результаты

1. При пултрузионной пропитке однонаправленного волокнистого слоя полимерным расплавом с увеличением вязкости расплава снижается степень наполнения и возрастает неоднородность микроструктуры, в результате чего снижается прочность материала при нагружении в трансверсальной плоскости. Увеличение натяжения слоя и подача расплава по предложенному способу [41] позволяют повысить степень наполнения и однородность композиций, получаемых пропиткой стеклоровинга высоковязкими расплавами [4, 15, 16, 37, 38, 43].

2. Характеристики жесткости и прочности длинноволокнистых литьевых материалов, получаемых пултрузионной пропиткой стеклоровинга расплавами полимеров крупнотоннажного производства, в том числе вторичными, положительно коррелированы с механическими свойствами матричного полимера и со степенью его наполнения (до 50 мас. %). С увеличением вязкости расплава матричного полимера экстремум прочности ДЛМ смещается в область более низких степеней наполнения. При изгибе и сжатии роль матрицы выше, чем при срезе, меньше и оптимальная степень наполнения [10, 16].

3. Увеличение длины армирующих волокон в исходной композиции за счет применения «падающих» режимов пластикации, даже в случае низкой прочности и адгезии матричного полимера, способствует достижению более высокой эффективной прочности волокон, чем в изделиях из коротковолокнистых композиций [10, 12, 16, 17, 28]. Количественные характеристики деформативности и прочности материала, необходимые для прогнозирования жесткости и прочности изделий, дает статистическая модель структуры и свойств, учитывающая распределение однонаправленных элементов по ориентациям [7, 20, 21].

4. На структуру и свойства стеклонаполненных композиций с вторичным ПЭТФ влияет кристаллизация матричного полимера, зависящая от режимов охлаждения при формообразовании изделий. Оценка кристалличности матричного полимера с помощью предложенной приближенной модели кристаллизации позволяет найти режимы охлаждения стренг и изделий, обеспечивающие более высокую прочность материала [8, 14, 22, 29].

5. При одностадийной пултрузии профильных изделий течение полимерного расплава под действием натяжения стренг приводит к трансформации структуры материала в сечении, к искривлению профилей и ограничивает производительность процесса. Уравнение фильтрации расплава через слой натянутых волокон, наряду с моделью пропитки волокнистого слоя дает соотношения между натяжением стренг и скоростью, при которых достигается наибольшая производительность, но ей соответствует лишь узкая область усилий натяжения, поэтому необходимо точное поддержание натяжения стренг [1, 2, 3, 9, 12, 13, 15, 16, 25, 26, 27]. Снижение температуры в зонах пропитки и консолидации стренг приводит к увеличению вязкости матричного полимера и смещению оптимальных усилий натяжения в область более высоких значений, но мало влияет на допустимую скорость пултрузии [5, 31, 37].

6. Параметры сечения профильных изделий гибридной структуры с заданной жесткостью при изгибе, получаемых из однонаправленной и хаотически армированной композиций по двухстадийной или одностадийной технологиям, удовлетворяющие критерию минимума стоимости удельной жесткости и прочности материала в изделиях адекватно устанавливаются по уровню допустимых деформаций частей [42]. Создание предлагаемого варианта гибридной структуры в стержнях, нагруженных изгибающим моментом, обеспечивает снижение удельной массы изделий в 2–10 раз. Комбинированная экструзионно-пултрузионной технология, включающая пултрузию однонаправленно армированных стренг, их консолидацию в экструзионной головке с пластицированной длиноволокнистой композицией, пригодна для матричных полимеров с высокой вязкостью расплава, в том числе вторичных [6, 19, 23, 33, 34, 37, 38, 40].

7. Длинноволокнистые и прессовочные материалы, получаемые по пултрузионной технологии из термопластичных полимеров крупнотоннажного производства, в том числе вторичных, армированных стеклянными волокнами, не уступают по технико-экономическим показателям зарубежным аналогам. По своим технологическим и эксплуатационным свойствам они пригодны для изготовления изделий конструкционного назначения [10, 15, 17]. Однонаправленно армированные ленты на основе ПП, получаемые методом пултрузии, при-

годны для изготовления высоконагруженных изделий, получаемых по одностадийной или двухстадийной пултрузионной технологии, а также стержней, профилей и труб гибридной структуры, получаемых по комбинированной экструзионно-пултрузионной технологии [19, 32, 34, 35, 36, 39, 44, 45]. Профили из стеклоармированных ПА-6 и ПЭТФ, в том числе вторичных, по технико-экономическим показателям превосходят аналогичные профили из алюминиевых сплавов и неармированных термопластичных полимеров, при этом пултрузионная технология обладает достаточной гибкостью в отношении выбора матричного полимера [11, 15, 17, 18, 24, 30, 37, 38].

2 Рекомендации по практическому использованию результатов

Длинноволокнистые стеклонаполненные композиции на основе ПА-6, ПЭТФ и ПБТ могут использоваться для изготовления изделий конструкционного, электротехнического и общего назначения, обладающих повышенными механическими свойствами. Из длиноволокнистых прессовочных композиций могут изготавливаться изделия конструкционного машиностроительного или электротехнического назначения, имеющие ребра жесткости, буртики, приливы и закладные детали, в том числе однонаправленно армированные стержни, стренги или ленты.

Профили, получаемые методом одностадийной пултрузии с использованием ПА-6, ПЭТФ и ПБТ, имеют более низкую стоимость единиц удельной жесткости и прочности, чем профили из алюминиевых сплавов и неармированных термопластов.

Затраты на освоение производства из вторичного ПЭТФ, армированного стеклорвингом, плоских и трубчатых гибридных стержневых элементов по комбинированной экструзионно-пултрузионной технологии для строительства и обустройства дорог окупятся в течение 8 месяцев. Расчетная стоимость 1 кг труб гибридной структуры в 2–3 раза меньше стоимости стеклопластиковых труб на основе терморезактивных полимерных связующих.

На основе предложенных и экспериментально проверенных в работе новых технических решений возможно производство по одностадийной пултрузионной технологии высоконагруженных стержней с криволинейной осью, в частности натяжных изоляторов для электрических сетей, что существенно расширяет сферу эффективного применения АТ. Согласно проекту ТЭО, затраты на освоение производства натяжных изоляторов из стеклоармированного ПБТ в ОАО «Могилевхимволокно» окупятся в течение 6 месяцев.

Методы исследования структуры и свойств АТ, пултрузионная технология получения АТ и изделий, разработанные в ходе выполнения диссертационных исследований, внедрены в учебный процесс по специальности 1.360108 – конструирование и производство изделий из композиционных материалов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи

1. Ставров, В.П. Влияние структуры на жесткость и прочность пултрудимых профилей из армированных термопластов / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич // *Zeszyty naukowe politechniki Bialostockiej. Nauki Techniczne*, № 138. *Mechanika*. – 2001. – *Zaszyt* 24. – С. 445–452.

2. Наркевич, А.Л. Трансформация структуры профиля из однонаправленно армированного термопласта при одностадийной пултрузии / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // *Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология органических веществ*. – 2001. – Вып. IX. – С. 127–129.

3. Режимы одностадийной пултрузии профилей из однонаправленно армированных термопластов / А.В. Марков, А.Л. Наркевич, О.И. Карпович, В.П. Ставров // *Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология органических веществ*. – 2001. – Вып. IX. – С. 130–134.

4. Наркевич, А.Л. Характеристики микроструктуры композитов, получаемых пултрузионной пропиткой стеклоровинга расплавом термопластичного полимера / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // *Труды БГТУ. Сер. VI, Физико-математические науки и информатика*. – 2002. – Вып. X. – С. 90–94.

5. Наркевич, А.Л. Оптимизация режимов пултрузии профилей из армированных термопластов / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // *Материалы. Технологии. Инструменты*. – 2003. – Т.8, № 4. – С. 75–79.

6. Ставров, В.П. Профили из армированных термопластов с гибридной структурой. 1. Конструкция / В.П. Ставров, О.И. Карпович, А.Л. Наркевич // *Материалы. Технологии. Инструменты*. – 2005. – Т.10, № 4. – С. 101–108.

7. Ставров, В.П. Структура и механические свойства термопластов, хаотически армированных стекловолокном / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2008. – № 1. – С. 66–70.

8. Наркевич, А. Л. Влияние структуры и режимов охлаждения на кристаллизацию вторичного стеклонаполненного ПЭТФ в изделиях / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // *Материалы. Технологии. Инструменты*. – 2009. – Т.14, № 2. – С. 65–71.

Материалы конференций

9. Ставров, В.П. Пултрузионная технология формообразования изделий из армированных термопластов / В.П. Ставров, А.Л. Ломец (Наркевич), А.В. Станелик // *Материалы. Технологии. Инструменты*. – 1996. – № 2. – С. 60–61.

10. Наркевич, А.Л. Длинноволокнистые стеклонаполненные термопласты для литья под давлением и прессования / А.Л. Наркевич, А.В. Марков, В.П. Ставров // *Полимерные композиты – 2000: сборник трудов Междун. науч.-техн. конф., Гомель, 12–13 сентября 2000 г. / ИММС НАНБ*. – Гомель, 2000. – С. 117–121.

11. Ставров, В.П., Структура и механические свойства стеклоармированных профилей на основе вторичного полиамида-6 / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич // *Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической промышленности и производстве строительных материалов: материалы докладов Междун.*

науч.-техн. конф., Минск, 9–10 ноября 2000 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; гл. ред. И.М. Жарский. – Минск, 2000. – С. 93–96.

12. Ставров, В.П. Энергосберегающие on-line-технологии производства изделий из термопластов, армированных волокнами / В.П. Ставров, А.В. Марков, А.Л. Наркевич // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической промышленности и производстве строительных материалов: материалы докладов Междун. науч.-техн. конф., Минск, 9–10 ноября 2000 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; гл. ред. И.М. Жарский. – Минск, 2000. – С. 96–99.

13. Наркевич, А.Л. Влияние структуры на устойчивость плоской формы изгиба пултрудируемых профилей из армированных термопластов / А.Л. Наркевич // Сборник материалов межвузовской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов, магистрантов, Гомель, 15–17 мая 2001 г. / Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени А.О. Сухого». – Гомель, 2001. – С. 103–105.

14. Наркевич, А.Л. Стеклонаполненные материалы на основе вторичного полиэтилентерефталата / А.Л. Наркевич // Новые технологии рециклинга вторичных ресурсов: материалы докладов Междун. науч.-техн. конф., Минск, 24–26 октября 2001 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; гл. ред. И.М. Жарский. – Минск, 2001. – С. 258–260.

15. Наркевич, А.Л. Структура и свойства композитов, получаемых в результате пропитки стеклоровинга расплавами термопластичных полимеров / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2002: материалы Всеросс. науч.-техн. конф., Пермь, 10–12 апреля 2002 г. / ПГТУ; под ред. Ю.В. Соколкина, А.А. Чекалкина. – Пермь, 2002. – С. 191.

16. Наркевич, А.Л. Длинноволокнистые и непрерывно армированные термопласты, получаемые методом пултрузии / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // Современные технологии, материалы, машины и оборудование: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16–17 мая 2002 г. / Могилевский гос. техн. ун-т; редкол. И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2002. – С. 226–227.

17. Ставров, В.П. Пултрузионная технология получения стеклоармированных термопластичных материалов и их применение в высокопрочных изделиях / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич, О.И. Карпович // Новые технологии в химической промышленности: материалы докладов Междун. науч.-техн. конф., Минск, 20–22 ноября 2002 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; гл. ред. И.М. Жарский. – Минск, 2002. – Ч.1. – С. 55–56.

18. Narkevich, A.L. The flexible producing of high-strength articles from fibre reinforced thermoplastics / A.L. Narkevich, V.P. Stavrov, K. Friedrich // Comp 03: International symposium on Advanced Composites, Corfu, Crece, May 5–7 2003 (CD-Room) – 9 p.

19. Стержневые элементы конструкций из армированных термопластов гибридной структуры / О.И. Карпович, А.Л. Наркевич, Н.Н. Саевец, В.П. Ставров // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы развития материалы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–26 мая 2005 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; гл. ред. И.М. Жарский. – Минск, 2005. – С. 242–244.

20. Ставров, В.П. Прогнозирование прочности термопластов, хаотически армированных длинными волокнами / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич // IV Międzynarodowe Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materialow i Konstrukcji, Augustow, 30 maja – 2 czerwca 2007 / Politechnika Białystok; red. A. Severyn. – Białystok, 2007 – S.247–250.

21. Ставров, В.П. Кинетика разрушения и прочность термопластов, хаотически армированных стекловолокном / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич // Актуальные проблемы прочности: материалы XLVI Междунар. конф., Витебск, 15–17 октября 2007 г. / Витебский гос. технолог. ун-т. – Витебск, 2007. – С. 139–144.

22. Наркевич, А.Л. Свойства и режимы переработки в изделия стеклонеполненных композиций на основе вторичного полиэтилентерефталата / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 мая 2008 г. / Беларус. гос. технолог. ун-т.; гл. ред. И.И. Жарский. – Минск, 2008 – С. 170–173.

23. Наркевич, А.Л. Экономичные профили гибридной структуры из стеклоармированных термопластов / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы междунар. научн.-техн. конф., Минск, 19–20 ноября 2008 г. / Беларус. гос.технолог.ун-т; гл. ред. И.М. Жарский: в 2 ч - Минск, БГТУ, 2008. – Ч.1. – С.342 – 346.

24. Наркевич, А.Л. Арматурные стержни из вторичного стеклоармированного полиэтилентерефталата / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы их развития: материалы междунар. научн.-техн. конф., Минск, 27–28 мая 2009 г. / Беларус. гос.технолог.ун-т; гл. ред. И.М. Жарский: Минск, БГТУ, 2008. – С.168 – 169.

Тезисы докладов

25. Ставров, В.П. Пултрузионная технология формообразования армированных изделий из вторичных термопластов / В.П. Ставров, А.Л. Ломец (Наркевич), А.В. Станелик // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: тез. докл. второй науч.-техн. конф., Гродно, 8–9 октября 1996 г. / Гродненское отделение Белорусской инженерно-технологической академии; ред.-сост. А.И. Свириденко [и др.]. – Гродно, 1996. – С. 184–185.

26. Ставров, В.П. Моделирование пултрузионного процесса производства волокнистых композитов с термопластичной матрицей / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич // Передовые технологии в производстве материалов и восстановлении изношенных поверхностей: тез. 2-й Междунар. конф., Минск, 24–25 марта 1997 г. / под ред. А.С. Калиниченко, Х.В. Бергмана. – Минск, 1997. – С. 52–53.

27. Stavrov, V.P. Simulation of pultrusion process of production of fibrous composite with thermoplastic matrix / V.P. Stavrov, A.L. Narkevich // Advanced Technologies for Material Processing and Repairing of Worn-out Surfaces: Theses 2nd International Conference, Minsk, March 24–25 1997 / Ed. A.S. Kalinichenko, H.W. Bergmann. – Minsk, 1997. – 11 p.

28. Марков, А.В. Длинноволокнистые стеклонаполненные термопласты для литья под давлением и прессования / А.В. Марков, А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // Полимерные композиты – 2000: тез. докл. Междуна. науч.-техн. конф., Гомель, 12–13 сентября 2000 г. / ИММС НАНБ. – Гомель, 2000. – С. 92–93.

29. Наркевич, А.Л. Высокопрочные волокнистые композиты на основе вторичного полиэтилентерефталата / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: тез. докл. 5-й Междуна. науч.-техн. конф., Гродно, 25–26 июня 2002 г. / Гродненский гос. ун-т; под ред. А.И. Свириденка, А.А. Михалевича. – Гродно, 2002. – С. 55.

30. Наркевич, А.Л. Гнутые стержневые элементы конструкций из односторонне армированных термопластов / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. Междуна. науч.-техн. конф., Гомель, 4–6 июля 2002 г. / Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени А.О. Сухого»; под общ. ред. С.Б.Сарело. – Гомель, 2002. – С. 18–19.

31. Наркевич, А.Л. Оптимизация режимов пултрузии профилей из армированных термопластов / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // Полимерные композиты – 2003: тез. докл. Междуна. науч.-техн. конф., Гомель, 22–24 июня 2003 г. / ИММС НАНБ; редкол. В.Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель, 2003. – С. 193–194.

32. Трубопроводы из армированных термопластов / В.П. Ставров, А.Б. Гоманькова, О.И. Карпович, А.Л. Наркевич // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: тез. докл. IV Междуна. науч.-техн. конф., Новополцк, 2003 г. / Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»; редкол. В.К. Липский [и др.]. – Новополцк, 2003. – С. 80–82.

33. Гоманькова, А.Б. Стержневые элементы конструкций из термопластов, неоднородно армированных непрерывными волокнами / А.Б. Гоманькова, А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // Современные проблемы машиноведения: тезисы докладов V Междуна. науч.-техн. конф., Гомель, 1–2 июля 2004 г. / Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»; под общ. ред. С.Б. Сарело. – Гомель, 2004. – С. 32–33.

34. Ставров, В.П. Гибридные структуры в изделиях из армированных термопластов / В.П. Ставров, О.И. Карпович, А.Л. Наркевич // Поликомтриб–2005: тез. докл. Междуна. науч.-техн. конф., Гомель, 18–21 июня 2005 г. / ИММС НАНБ; редкол. В.Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель, 2005. – С. 101–102.

35. Карпович О.И. Высокопрочные стержни и трубы из армированных термопластов / О.И. Карпович, А.Л. Наркевич, В.П. Ставров // Поликомтриб–2005: тез. докл. Междуна. науч.-техн. конф., Гомель, 18–21 июня 2005 г. / ИММС НАНБ; редкол. В.Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель, 2005. – С. 102–103.

36. Трубы и профили из армированных термопластов / В.П. Ставров, О.И. Карпович, А.Л. Наркевич, Е.Ф. Шаляпина // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: тез. докл. 6-ой Междуна. науч.-техн. конф., Гродно, 14–15 сентября 2005 г. / Гродненский гос. ун-т; под ред. А.И. Свириденка, В.А. Бородули. – Гродно, 2005 – С. 87.

37. Ставров, В.П. Гибкая пултрузионная технология армирования термопластичных полимеров / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич // Перспективные материалы и технологии: тез. докл. Межд. симп., Витебск, 25–29 мая 2009 г. / Учреждение образования Витебский государственный технологический университет; гл. ред. В.В. Рубаник. – Витебск, 2009. – С. 46.

38. Наркевич, А.Л. Управление структурой волокнистых композиционных материалов с термопластичной матрицей, получаемых пултрузией / А.Л. Наркевич, В.П. Ставров / Поликомтриб–2009: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22–25 июня 2009 г. / ИММС НАНБ; редкол. В.Н. Адериха [и др.]. – Гомель, 2009. – С. 163.

Заявки и патенты на изобретения и полезные модели

39. Труба из композиционных материалов и способ ее изготовления: пат. 12813 Респ. Беларусь, МПК (2006) F 16 L 9/00 / В.П. Ставров, О.И. Карпович, А.Б. Гоманькова, А.Л. Наркевич; заявитель В.П. Ставров. – № а 20030588, заявл. 12.06.03.

40. Способ изготовления полимерного стержня, армированного непрерывными и дискретными волокнами: МПК (2006) В 29 С 47/02 / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а20081347; заявл. 24.10.08.

41. Способ получения армированного волокнами термопластичного материала: МПК (2006) В 29 В 15/12 / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а 20081348; заявл. 24.10.08.

42. Профильное изделие из термопластичного полимера, армированного волокнами: пат. 5230 Респ. Беларусь, МПК(2006) В 29 С 70/00 / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич. заявитель Белорус. гос. технол. ун-т – № и 20080791; заявл. 24.10.08; опубл. 30.04.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. - 2009. - № 2 (67). – С. 171-172.

43. Устройство для размотки наковки стеклоровинга с постоянным натяжением: пат.5379 Респ. Беларусь, МПК(2006) В65Н 77/00 / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич. заявитель Белорус. гос. технол. ун-т – № и 20080792; заявл. 24.10.08; опубл. 01.04.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. - 2009. - № 3 (68). – С. 133-134.

44. Арматурный стержень из волокнистого композита: МПК (2006) F 04 С 5/07 / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а 20090745; заявл. 21.05.09.

45. Способ изготовления полого неосесимметричного изделия из термопластичного полимера, армированного непрерывными волокнами: МПК (2006) В 29 С 70/32 / В.П. Ставров, А.Л. Наркевич; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а 20090858; заявл. 11.06.09.



РЕЗЮМЕ

Наркевич Анна Леонидовна

Особенности структуры и свойств стекловолоконистых композитов с термопластичной матрицей, полученных методом пултрузии

Ключевые слова: термопластичные полимеры, стеклянные волокна, армирование, композиты, пултрузия, пропитка, микро- и макроструктура, структурообразование, свойства, профильные изделия, формообразование, вязкость, усилие, скорость, производительность.

Цель исследования – повышение эффективности и расширение области применения высокопрочных композиционных материалов на основе термопластичных полимеров, в том числе вторичных, в изделиях конструкционного назначения, получаемых с использованием гибких энерго- и ресурсосберегающих пултрузионных технологий.

Объект исследования – термопластичные полимеры, в том числе вторичные, армированные стеклянными волокнами, получаемые по пултрузионной технологии, и изделия из стеклоармированных термопластов.

Предмет исследования – параметры микро- и макроструктуры, характеристики свойств армированных термопластов и изделий, параметры процессов структурообразования материала и формообразования изделий.

Методы исследования. Компьютерное моделирование вязкого течения полимерного расплава в процессах структурообразования, неоднородной структуры и процессов деформирования армированных термопластов, физико-механические методы анализа структуры и свойств, измерение параметров пултрузии на экспериментальной установке и свойств получаемых изделий.

Результаты и их новизна. Установлены закономерности влияния вязкости расплава и натяжения волокон на степень наполнения и однородность микроструктуры армированных термопластов при пултрузионной пропитке, на формирование макроструктуры при пултрузии профильных изделий, характеристики влияния длины и ориентации волокон на свойства материалов в изделиях. На основе этих закономерностей сформулированы рекомендации по управлению структурой при формообразовании изделий из высоковязких полимеров, обеспечивающие повышение гибкости и производительности процесса, конкурентоспособность изделий из армированных термопластов, расширение областей их эффективного применения за счет снижения себестоимости и более высоких показателей удельной жесткости и прочности в изделиях.

Степень использования результатов. Методом пултрузии получены опытные партии стеклоармированных материалов из термопластов крупнотоннажного производства, в том числе вторичных, изготовлены и испытаны экспериментальные образцы изделий, в том числе стержней и профилей с гибридной структурой и криволинейных, предложены новые технические решения, разработаны проекты технической документации на новые материалы и изделия и даны технико-экономические обоснования их производства.

РЭЗІЮМЭ

Наркевіч Ганна Леанідаўна

Асаблівасці структуры і ўласцівасцей шклоарміраваных кампазітаў з тэрмапластычнай матрыцай, атрыманых метадам пултрузіі

Ключавыя словы: тэрмапластычныя палімеры, шкляныя валокны, арміраванне, пултрузія, прамочванне, мікра- і макраструктура, структураўтварэнне, уласцівасць, профільныя вырабы, формаўтварэнне, вязкасць, намаганне, хуткасць, прадукцыйнасць:

Мэта даследавання – павышэнне эфектыўнасці і машырэннае вобласці выкарыстання ў вырабах канструкцыйнага прызначэння, якія атрымліваюцца з выкарыстаннем гібкіх энерга- і рэсурсазберагальных пултрузійных тэхналогій, высокатрывалых кампазіцыйных матэрыялаў на аснове тэрмапластычных палімераў, у тым ліку другасных.

Аб'ект даследавання – тэрмапластычныя палімеры, у тым ліку другасныя, арміраваныя шклянымі валокнамі, якія атрыманы на пултрузійнай тэхналогіі, і вырабы са шклоарміраваных тэрмапластаў.

Прадмет даследавання – параметры мікра- і макраструктуры, характарыстыкі ўласцівасцей арміраваных тэрмапластаў і вырабаў, параметры працэсаў структураўтварэння матэрыялу і формаўтварэння вырабаў.

Метады даследавання. Камп'ютэрнае мадэляванне вязкага цяжэння палімернага расплаву ў працэсах структураўтварэння, неаднароднай структуры і працэсаў дэфарміравання арміраваных тэрмапластаў, фізіка-механічныя метады аналізу структуры і ўласцівасцей, вымярэнне параметраў пултрузіі на эксперыментальнай устаноўцы і ўласцівасцей атрыманых вырабаў.

Вынікі і іх навізна. Устаноўлены заканамернасці ўплыву вязкасці расплаву і нацяжэння валокнаў на ступень напаянення і аднароднасць мікраструктуры арміраваных тэрмапластаў пры пултрузійнам прамочванне, на фарміраванне макраструктуры пры пултрузіі профільных вырабаў, характарыстыкі ўплыву даўжыні і арыентацыі валокнаў на ўласцівасці матэрыялаў у вырабах. На аснове гэтых заканамернасцей сфармуляваны рэкамендацыі па кіраванні структурай пры формаўтварэнні вырабаў з высакавязкіх палімераў, якія забяспечваюць павышэнне гібкасці і прадукцыйнасці працэсу, канкурэнтаздольнасць вырабаў з арміраваных тэрмапластаў, пашырэннае абласцей іх эфектыўнага скарыстання за кошт зніжэння сабекошту і больш высокіх паказчыкаў удзельнай жорсткасці і трываласці ў вырабах.

Ступень выкарыстання вынікаў. Метадам пултрузіі атрыманы доследныя партыі шклоарміраваных матэрыялаў з тэрмапластаў буйнатарнажнай вытворчасці, у тым ліку другасных, выраблены і выпрабаваны эксперыментальныя ўзоры вырабаў, у тым ліку стрыжняў пераменнага сячэння, профіляў з гібрыднай структурай і крываплінейных, запатэнтаваны новыя тэхнічныя рашэнні, распрацаваны праекты тэхнічнай дакументацыі на новыя матэрыялы і вырабы і дадзены тэхніка-эканамічныя абгрунтаванні іх вытворчасці.

SUMMARY

Narkevich Hanna Leonidovna

Peculiarities of structure and properties of glass fiber reinforced thermoplastics manufactured by pultrusion

Key words: thermoplastics, glass fibers, reinforcing, pultrusion, impregnating, composites, micro- and macrostructure, properties, profile articles, formation, viscosity, pulling force, speed, productivity.

Aim of research – increase of efficiency and expansion of application area of the high-strength reinforced thermoplastic polymers, including secondary, manufactured by flexible energy and resources saving pultrusion techniques in the construction articles.

Object of research – thermoplastics, including secondary, reinforced with the glass fibers, produced by pultrusion techniques, and articles from glass fibers reinforced thermoplastics.

Subject of research – parameters micro- and macrostructures, properties of the reinforced thermoplastics and articles, process parameters of composites and articles formation.

Methods of research. Computer simulation of a viscous flow of polymer melt by pultrusion, inhomogeneous structure and shaping of the reinforced thermoplastics, physical and mechanical methods by analysis of structure and properties, measurement of pultrusion parameters on experimental installation and properties of materials and articles.

The research results and their novelty. Regularities of agency of melt viscosity and a filament tension on extent of filling up and a microscopic structure homogeneity of the reinforced thermoplastics at pultrusion impregnating, on macrostructure shaping at pultrusion profile articles, performance of agency of length and orientation of filaments to materials properties in articles are installed. On the basis of these regularities recommendations about control of structure are formulated at formation of articles from the high viscosity polymers, providing ensuring increase and productivity of process, competitive strength of articles from the reinforced thermoplastics, areas of their effective application at the expense of decrease of the cost price and higher indexes of specific rigidity and strength in articles.

Use of results. The pultrusion method gains experimental batches glass fibre reinforced thermoplastics of large-capacity manufacture, including secondary, experimental samples of articles, including rods of a variable section, profiles with hybrid structure and curvilinear are made and tested, new designs are licensed, engineering specifications designs on new materials and articles and feasibility reports on their manufacture are developed.

Научное издание

Наркевич Анна Леонидовна

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
СТЕКЛОВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ
С ТЕРМОПЛАСТИЧНОЙ МАТРИЦЕЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПУЛТРУЗИИ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.01 – Материаловедение
(химическая промышленность)

Ответственный за выпуск А.Л. Наркевич

Подписано в печать 23.12.2009. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,6. Уч.-изд. л. 1,6.

Тираж 60 экз. Заказ 569.

Учреждение образования

«Белорусский государственный технологический университет».

220006, Минск, Свердлова, 13а.

ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».

220006, Минск, Свердлова, 13.

ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.