

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОПОНЕНТА

на диссертацию

**Казакова Ильи Александровича**

### **«Разработка технологии непрерывного формования осесимметричных композитных изделий методом пултрузии»**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.06. - Технология и переработка полимеров и композитов

Рецензируемая диссертационная работа представляет собой самостоятельное научное исследование, посвященное оптимизации технологии непрерывного формования осесимметричных композитных изделий методом пултрузии и ее разновидности - нидлтрузии. Актуальность темы диссертации прежде всего определяется тем, что пултрузионные осесимметричные изделия (строительная арматура, кабельная продукция, электроизоляционные стержни, трубы) применяются в различных отраслях промышленности, и области их применения постоянно расширяются. В этой связи, выбранное диссертантом направление работы, касающееся исследования основных процессов, происходящих при производстве пултрузионных изделий, а также оптимизации этих процессов, несомненно, актуально.

**Научная новизна.** Разработана усовершенствованная математическая модель технологического процесса пултрузии. Её адекватность подтверждена приборными методами и на пилотном оборудовании. Это позволило усовершенствовать технологию и некоторые элементы оборудования процесса.

**Практическая значимость.** Результаты оптимизации технологии изготовления изделий из стеклопластика методом пултрузии дали возможность увеличить производительность изготовления арматуры, стержней и труб на 10-60% и сделать пултрузионные изделия бездефектными.

Работа внедрена в ООО «Машспецстрой» (г. Пермь), ООО «НЦК» (г. Москва) и ООО «Полимерпром» (Н. Новгород).

**Достоверность научных результатов и выводов, содержащихся в диссертации,** подтверждается воспроизводимостью и взаимной дополняемостью статистически обработанных экспериментальных данных, полученных с использованием современных методов исследования, а также воспроизводимостью результатов лабораторных исследований и промышленной апробации.

**Структура и объем работы.** Диссертация Казакова И. А. имеет общепринятую структуру, соответствующую требованиям ВАК РФ. Работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы (128 источников), включает 77 рисунков, 16 таблиц, 4

приложения и изложена на 186 страницах (включая приложения).

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследования, изложено содержание диссертационной работы.

**В первой главе** рассмотрены свойства и особенности композитных изделий, получаемых пултрузией. Раскрыты преимущества пултрузии перед другими способами формования изделий из полимерных композиционных материалов. Приведено описание процесса пултрузии и ее разновидности (нидлтрузии). Приведен подробный анализ отечественной и зарубежной литературы по моделированию пултрузионного процесса. Обзор литературы показал, что существующие математические модели пултрузии имеют ограниченные возможности. Тем самым автор доказал, что разработка модели процесса непрерывного формования осесимметричных изделий из ПКМ является актуальной задачей для современной промышленности.

**Вторая глава** посвящена объектам исследований и использованным методикам. В качестве наполнителя автором выбран стеклоровинг, в качестве связующих автор остановился на зарубежных аналогах отечественной эпоксидной смолы ЭД-20. В этой главе достаточно подробно описаны характеристики используемых материалов и методов исследований. Вынесение методик в отдельную главу существенно облегчает изучение работы и понимание полученных результатов.

**В третьей главе** представлен численный метод решения задачи теплопроводности и отверждения связующего для стержней и труб. Для решения задачи был применен метод конечных разностей с неявной разностной схемой. Производные заменялись при этом их разностными аналогами. Разработанная автором модель учитывает наличие нагреваемых конических участков фильеры и различные источники нагрева.

Для определения давления связующего была разработана математическая модель на основе использования закона Дарси. В качестве пористой среды выступали волокна, а в качестве жидкости – связующее. Постановка задачи и ее решение были выполнены для двух типов конструкции преформовочного устройства и входного участка фильеры. Для решения задачи был также применен метод конечных разностей.

Для решения задачи определения напряженно-деформированного состояния материала стержня автором было получено дифференциальное уравнение на основе закона Гука для трансверсально-изотропного материала. Следует отметить, что деформации от усадки входят непосредственно в уравнения связей напряжений и деформаций, что к процессу пултрузии применяется впервые.

Усилие протяжки при прохождении пропитанных связующим волокон через нагретую фильеру рассматривалось автором как результат действия сил, действующих на различных



участках фильеры.

В результате автором была разработана наиболее общая из известных на данный момент математическая модель пултрузии осесимметричных изделий для определения температуры, степени отверждения и давления связующего, напряженно-деформированного состояния материала и усилия протяжки. Модель позволила выполнить задачи оптимизации технологического процесса пултрузии и сформулировать технологические рекомендации.

**В четвертой главе** приводится описание проведенных экспериментов. Измерение температуры внутри композитного стержня в процессе его отверждения проводилось на производственной установке на первом участке полимеризационной печи, оснащенной инфракрасными обогревателями. Для измерения температуры использовалась незащищенная термопара.

Степень отверждения определяли с помощью метода ДСК.

Диссертантом была определена величина усилия протяжки стержня диаметром 8 мм при прохождении неотвержденного материала через формующую втулку. Это позволило оценить возможности тянущего устройства, что было отражено в одном из актов о внедрении.

Приведены результаты лабораторных исследований кинетических и реологических свойств связующего на основе смолы EPOTEC® YDL 680. Полученные данные использовались в математической модели пултрузии стержней и труб.

Диссертантом определены причины возникновения дефектов внешней поверхности стержней и показано, что при помощи оптимизации температурно-скоростного режима пултрузии таких дефектов можно избежать.

Диссертантом было выполнено также математическое моделирование пултрузии стержня диаметром 76 мм. Было установлено, что опасные максимальные окружные напряжения на поверхности стержней диаметром 50-80 мм возникают на расстоянии 60-250 мм от фильеры.

Проведенные Казаковым И. А. эксперименты позволили сделать вывод о достоверности разработанной математической модели.

**В пятой главе** диссертант приводит результаты оптимизации температурно-скоростного режима пултрузии стержней диаметром 16 мм. Было обнаружено, что для связующего на основе смолы EPOTEC YDL 680 необходимо увеличить температуру первой секции фильеры до максимально возможного, чтобы получить изделие с хорошим качеством поверхности. При этом для достижения максимальной скорости пултрузии температура второй секции должна быть порядка 155 °С. При температуре второй секции фильеры, выше указанной, качество поверхности стержня ухудшается, а при более низкой температуре изделие не успевает отвердиться до выхода из фильеры. Полученный оптимальный

температурно-скоростной режим сложно установить в заводских условиях без использования математического моделирования процесса. Результаты работы были внедрены на производственном предприятии ООО «НЦК», что отражено в акте о внедрении.

Диссертант приводит результаты оптимизации температурно-скоростного режима безфильерного процесса формования стержней диаметром 8 мм. Было установлено, что предварительный подогрев материала способствует снижению энергозатрат на обогрев 1 и 2 секций полимеризационной печи при неизменной скорости протяжки, а при увеличении скорости протяжки возрастают энергозатраты как на предварительный нагрев материала, так и на дополнительное повышение температуры в полимеризационной печи. В результате оптимизации производительность процесса изготовления композитной арматуры диаметром 8 мм была увеличена на 9%, что отражено в акте о внедрении результатов работы на предприятии ООО «Машспецстрой».

Предложено описание оптимизации геометрии конусного участка фильеры для пултрузии стержня диаметром 80 мм. Установлено оптимальное соотношение между углом конусности входного участка фильеры, его длиной и радиусом изделия, из которого можно определить оптимальное значение угла или длину конусного участка фильеры при заданных двух других параметрах. Методика определения оптимального угла конуса входного устройства фильеры используется в процессе деятельности ООО «Полимерпром» при разработке технологии и оборудования пултрузии, что отражено в акте о внедрении.

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 печатных работах, из которых 5 работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 работы в изданиях, входящих в систему цитирования Web of science и Scopus. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертации.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. В названии диссертации слово «разработка...» следовало бы заменить на «оптимизация..» или «усовершенствование...», или вставить после «разработка оптимизированной (усовершенствованной)...».
2. Автор явно злоупотребляет моделированием. Так, в разделе 4, посвященном экспериментальной проверке математической модели, разработанной в разделе 3, подразделы 4.4 и 4.5 – это тоже отчасти моделирование. В разделе 5 – «оптимизация процесса» не всегда понятно, где модель, где эксперимент.
3. Не в полной мере обоснован выбор смол и отвердителей. С точки зрения импортозамещения было бы целесообразным проверить отечественную смолу ЭД-20. Не ясно, почему выбраны 2 системы отверждения – аминная и ангидридная. Диссертант сразу обозначил их как №1 и №2 и больше к химии не обращался. На мой взгляд, зря – обнаружил бы много интересного.



4. Следовало бы проверять физико-механические свойства пултрузионных изделий, полученных по оптимизированной (ускоренной) технологии на их соответствие нормативно-технической документации.

5. Приложения 2-4 – компьютерные программы моделирования отдельных элементов пултрузии, они утяжеляют работу и их не обязательно включать в диссертацию. Может быть удастся реализовать их на коммерческой основе.

Однако, эти замечания не снижают общей положительной оценки данной работы.

Считаю, что диссертация Казакова И.А. «Разработка технологии непрерывного формования осесимметричных композитных изделий методом пултрузии» является законченной научно-квалифицированной работой, отличается новизной и содержит много полезной информации.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.17.06 - Технология и переработка полимеров и композитов в пункте 2 формулы специальности и в пунктах 2 и 3 области исследований, оформлена согласно требованиям, содержание автореферата и опубликованные труды отражают основные результаты и выводы проведенных исследований.

Данная работа соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Казаков Илья Александрович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.06 - Технология и переработка полимеров и композитов.

#### **Официальный оппонент**

Советник генерального директора  
по научным вопросам  
ООО «Научно-исследовательский институт  
эластомерных материалов и изделий»,  
Заслуженный деятель науки РФ  
доктор технических наук, профессор  
(специальность 05.17.06 – Технология и  
переработка полимеров и композитов)

Ю.Л. Морозов

Подпись Ю.Л. Морозова заверяю.

*Зам. ген. Директора ООО «НИИЭМИ»*  
Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт  
эластомерных материалов и изделий» (ООО «НИИЭМИ»)



111024, г. Москва, Перовский проезд, д.2, стр. 1  
Телефон: +7(495) 600-07-60; +7(495) 604-42-12; Факс: +7(495) 600-06-42  
E-mail: mail@niiemi.com