

ОТЗЫВ

ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора

Люсовой Людмилы Ромуальдовны

на диссертацию Евдокимова Антона Андреевича на тему:

«Полимерный композиционный материал, изготавливаемый

по технологии вакуумной инфузии с формообразованием при

температурах до 40°C», представленную на соискание учёной степени

кандидата технических наук по специальности 05.17.06 – Технология и

переработка полимеров и композитов

Актуальность темы исследования

Развитие современной техники требует новых конструкционных материалов, превосходящих по своим прочностным, упругим и другим свойствам традиционные. К числу наиболее интересных и перспективных относятся полимерные материалы (пластики, эластомеры, волокна) и, в первую очередь, композиционные полимерные материалы (ПКМ), которые производятся из двух или более составляющих материалов. Эти составляющие имеют заметно отличающиеся химические или физические свойства и объединяются для создания материала со свойствами, отличными от свойств отдельных элементов.

В настоящее время ПКМ в строительной отрасли используются при изготовлении элементов конструкций по технологии пултрузии, намотки, автоклавного формования (швеллеры, балки, арматура и др.). Изготовление таких конструкций производится в заводских условиях с применением громоздкого специализированного оборудования. Такие конструкции перспективны к применению для строительства объектов, на которые возможен доступ способного перевозить их длинномерного транспорта. Однако для объектов, расположенных в труднодоступной для такого транспорта местности использование конструкций из ПКМ, полученных в заводских условиях, затруднительно. Для решения задачи использования ПКМ в конструкциях подобного рода для строительных объектов автором настоящей работы предложена технология изготовления крупногабаритных арочных несущих конструкций из углепластика в «полевых» условиях, что позволяет характеризовать тему исследования Евдокимова А.А. как крайне важную и актуальную.

Структура и содержание работы.

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и основных выводов, списка литературы из 105 наименований, содержит рисунков – 58, таблиц – 43. Общий объём диссертации – 116 страниц машинописного текста.

Во введении приведена общая характеристика работы, дано обоснование актуальности выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе представлен литературный обзор, в котором изложена информация о способах формования изделий из ПКМ, применимых для изготовления изделий в «полевых условиях». Рассмотрены основные особенности каждого из методов и обоснована целесообразность использования метода вакуумной инфузии как наиболее подходящего для выполнения поставленной цели.

Рассмотрены типы связующих, которые наиболее эффективны для изготовления ПКМ методом вакуумной инфузии. Установлено, что наиболее подходящим является эпоксивинилэфирное связующее, обеспечивающее наилучшую стойкость к воздействию факторов внешней среды и необходимый уровень физико-механических характеристик ПКМ.

Вторая глава содержит информацию об используемых в работе материалах, оборудовании и методах исследования, в том числе для проведения климатических, испытаний, исследования микрорельефа поверхности ПКМ, а также определения прочностных упруго-прочностных характеристик как ПКМ, так и крупноразмерных конструкций из него.

Третья глава состоит из трёх разделов и посвящена исследованию технологических свойств эпоксивинилэфирного связующего ВСВ-43 при изготовлении ПКМ на его основе. Установлены температурно-временные зависимости изменения вязкости связующего, и на их основе определен оптимальный температурный интервал переработки связующего по технологии вакуумной инфузии - $20\div 25^{\circ}\text{C}$. Установлено, что в этом интервале температур время технологической жизнеспособности связующего составляет $120\div 130$ мин, что позволяет перерабатывать его в изделия достаточно больших габаритов. При исследовании влияния режимов отверждения на свойства образцов связующего установлено, что режим отверждения $20^{\circ}\text{C} - 24$ ч.; $+80^{\circ}\text{C} - 4$ ч. обеспечивает наилучшие упруго-прочностные свойства.

Исследования влияния эксплуатационных факторов (при температуре 60°C и влажности воздуха 85%, в воде при 60°C в течение 30 дней, в кипящей воде при 100°C в течение 24 ч. и в щелочной среде с $\text{pH} = 13$) на свойства

отвержденного связующего показали, что сохранение прочности при испытаниях на статический изгиб по отношению к значениям прочности исходных отвержденных образцов ВСВ-43 достаточно высоко и составляет от 80 до 96% в зависимости от вида и температуры испытаний.

Четвёртая глава посвящена выбору оптимального типа наполнителя для изготовления ПКМ и конструкционного элемента из него. Рассмотрены стеклянные и углеродные наполнители и выбраны углеродные жгуты, поскольку только использование данного типа сырья позволит обеспечить необходимый эффект для совместного использования ПКМ с бетоном для достижения эффекта «обоймы». Изготовление преформы предложено производить на машине Herzog RF 1-144-120. С помощью математических методов рассчитано, что использование при изготовлении преформы углеродных жгутов марки Panex 35 с количеством филаментов 48К, расположенных под углом 30° к оси направления плетения, позволяет получать ПКМ с максимально возможными упруго-прочностными характеристиками.

Пятая глава состоит из четырёх разделов, в первом из которых описана технология изготовления ПКМ на основе эпоксивинилэфирного связующего и плетеной преформы способом вакуумной инфузии. Второй посвящен описанию влияния эксплуатационных факторов на физико-механические и термомеханические свойства углепластика ВКУ-51. Условия экспонирования при исследовании были взяты такие же, как и при исследовании связующего с той лишь разницей, что срок экспозиции был увеличен в 2 раза. Установлено, что сохранение прочности образцов ПКМ при испытаниях на статический изгиб составляет от 75 до 90%, как и для образцов отвержденного связующего. Наибольшее влияние на физико-механические характеристики углепластика ВКУ-51 оказала экспозиция в воде при температуре 60°C в течение 62 суток. Третий раздел посвящён исследованию влияния структуры армирования углепластика ВКУ-51 на его упруго-прочностные свойства при растяжении, сжатии и изгибе. Установлено, что для создания эффекта обоймы в арочной трубобетонной конструкции углепластик для изготовления арочной оболочки должен иметь угол армирования не более 35-40 град. В четвертом разделе представлены данные исследований влияния натурального экспонирования плит углепластика без нанесения защитного лакокрасочного покрытия на открытом стенде в г. Москва и г. Геленджик в течение 1, 3 и 5 лет на физико-механические характеристики и микрорельеф поверхности углепластика. Выявлено, что после 5 лет экспозиции в Москве и Геленджике сохранение

физико-механических характеристик наблюдается на уровне 90%. В то же время деградация поверхности углепластика на теневой стороне происходит значительно медленнее по сравнению с деградацией лицевой поверхности. Данное обстоятельство объясняется автором воздействием ультрафиолетового излучения и эрозией мелкими частицами.

Шестая глава посвящена описанию технологии изготовления крупногабаритных арочных конструкций из углепластика ВКУ-51 в «полевых условиях» и исследованию их работоспособности. Технология изготовления арочных элементов состоит из следующих стадий:

1. Изготовление преформы из углеродного волокна;
2. Подготовка преформы к изготовлению пакета заготовки;
3. Изготовление пакета-заготовки;
4. Пропитка арочного элемента связующим и его термообработка.

Для исследования работоспособности конструкции были изготовлены арочные элементы из углепластика толщиной 3 мм, внутренним диаметром 300 мм, длиной 8 м и стрелой подъёма 1,6 м с двумя типами укладки армирующего наполнителя – 30° и 40°. Внутри арочных элементов был залит бетон марки В40 с образованием бетонного сердечника и проведены их испытания на специализированном испытательном стенде. Установлено, что несущая способность арочных элементов с углом армирования 30° вдоль оси элемента выше в 1,8 раз и составляют 27 тонн. Затем были проведены испытания по определению несущей способности образцов толщиной 6 мм такого же размера при динамической и статической нагрузке. При малоцикловом нагружении на базе 10^4 циклов образец выдержал нагрузку амплитудой 6 т и частотой 1 Гц, а при амплитуде 10 т и частотой 1 Гц разрушение произошло более чем через 10^5 циклов. При статическом нагружении установлено, что средняя прочность образцов составила 30,34 т. при разбросе от 27,1 до 32,5 тонн. Полученные данные свидетельствуют о высокой прочности и надёжности арочных конструкций и их пригодности для применения в качестве несущих строительных конструкций.

Седьмая глава описывает практическую реализацию полученных в работе результатов: перечислена разработанная технологическая документация, даны ссылки на полученный патент и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Новизна и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Работа содержит новые научные результаты, полученные в ходе исследований.

1. Проведено комплексное исследование всех стадий технологии вакуумной инфузии, начиная с формулирования требований к изделию и сырью модифицированного ПКМ и заканчивая исследованиями его структуры, технологических и эксплуатационных (реальных, требующих очень длительных климатических испытаний) характеристик ПКМ, что позволило изготовить на его основе в «полевых» условиях без применения крупногабаритного оборудования успешно выдержавшие испытания качественные несущие строительные конструкции.

2. Определены основные реокинетические характеристики процесса гелеобразования, а также степень конверсии при отверждении модифицированного эпоксивинилэфирного связующего с использованием методов ДСК и ДМА, что дало возможность охарактеризовать закономерности и механизм структурообразования в связующем и оптимизировать режим его отверждения в ПКМ.

3. Сформулированы требования и проведено математическое моделирование для оценки характеристик армированного ПКМ при растяжении, далее проверенное экспериментально, позволившее оптимизировать структурные характеристики углепластика в изделии. Проведенное моделирование процесса вакуумной инфузии в программе RAM-RTM, позволило оптимизировать изменение положения фронта связующего и с учетом процесса его желатинизации предложить оптимальную схему инъекции.

Новизна результатов подтверждена получением патента РФ на способ изготовления полого конструктивного элемента.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

подтверждается применением поверенных и аттестованных средств измерения, современных методов исследований, а также комплексных исследований большого количества экспериментальных образцов и статистической обработкой значительного объема экспериментальных данных. Результаты исследования, приведенные в диссертации, не противоречат данным, опубликованным в открытой печати.

Практическая значимость работы

Наиболее важным достижением работы является то, что с использованием углепластиковых арочных конструкций, изготовленных по разработанной Евдокимовым А.А., технологии из углепластика ВКУ-51, был построен первый в Российской Федерации автомобильный арочный мост с двумя полосами проезжей части и двумя тротуарами длиной 19,6 м, шириной 12 м с максимальной нагрузкой до 100 тонн. Мост введен в эксплуатацию в 2017 году и безаварийно эксплуатируется и в настоящее время.

Основные замечания и вопросы по работе:

1. Полный количественный состав связующего ВСВ-43 не раскрывается, детали оптимизации состава отсутствуют.

2. Не понятно, каким образом был установлен коэффициент запаса в 10-15% при расчетах минимальных требований физико-механических характеристик углепластика (глава 4).

3. В разделе 4.1, посвященном анализу и выбору армирующего наполнителя для изготовления преформы, не четко описано сложнапряженное состояние оболочки из углепластика и то, что оптимальным углом плетения рукава преформы является именно угол 30°.

4. Не представлены значения разброса характеристик на рисунках, иллюстрирующих зависимости вязкости связующего от температурно-временных параметров его отверждения (в главе 3– рис. 12, 15), зависимость упруго-прочностных свойств углепластика ВКУ-51 при разных видах нагружения (в главе 5– рис. 36, 39).

5. Не даётся объяснений, почему для контроля качества арочных элементов используется акустический импедансный метод.

6. Некоторые технические термины используются некорректно, например, «сильная усадка» (с. 20); «*полярных растворителей* (вода, *нефтепродукты*)» (с. 21); «это может быть объяснено *образованием зародышей кристаллов* в полимерной матрице материала» (с. 85).

7. В работе имеются опечатки.

Сделанные выше замечания не снижают общую положительную оценку диссертации Евдокимова А.А. и не умоляют ее научной и практической значимости.

Заключение.

Представленная автором диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технологические решения и разработки в области использования плетёных

преформ из эпоксивинилэфирного связующего для изготовления ПКМ методом вакуумной инфузии, что имеет существенное значение не только для строительства, а также для авиационной и ракетно-космической отраслей промышленности. Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание и выводы работы.

По актуальности, научной новизне, практической значимости полученных результатов и оформлению диссертационная работа Евдокимова А.А. на тему: «Полимерный композиционный материал, изготавливаемый по технологии вакуумной инфузии с формообразованием при температурах до 40°C» полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, согласно пунктам 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., с изменениями по постановлению Правительства Российской Федерации №335 от 21 апреля 2016 г., а ее автор Евдокимов Антон Андреевич заслуживает присвоения степени кандидата технических наук по специальности 05.17.06 – «Технология и переработка полимеров и композитов».

Официальный оппонент:

Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Химия и технология переработки эластомеров» ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет» (институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова), специальность 05.17.06

 Л.Р. Люсова
29.04.2022

119571, г. Москва, проспект Вернадского, 78.

Тел.: 8(495) 246-05-55 (доб. 458)

www.mirea.ru

lyusova@mirea.ru

Подпись заведующего кафедрой «Химия и технологии переработки эластомеров им. Ф.Ф. Кошелева» (ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»), д.т.н., профессора Л.Р. Люсовой заверяю.

Первый проректор ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,

д.х.н., профессор



Н.И. Прокопов