

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертационную работу  
Косенко Екатерины Александровны  
на тему «Волокнистые полимерные композиционные материалы на основе  
эпоксидной матрицы с двухфазной схемой армирования», представленную  
на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 2.6.11. Технология и переработка синтетических и  
природных полимеров и композитов**

Представленная на оппонирование диссертационная работа состоит из введения, семи глав и заключения, изложена на 227 страницах машинописного текста, содержит 77 рисунков, 40 таблиц, список использованной литературы из 269 наименований и 2 приложения.

### **1. Актуальность темы диссертационной работы**

Разработка инновационных композиционных материалов открывает новые возможности для технологического развития и создания передовых продуктов аэрокосмической, автомобильной, строительной, энергетической и многих других отраслей.

В настоящее время создание новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) в основном развивается по пути гибридизации полимерных матриц и армирующих материалов и использования наноразмерных наполнителей и добавок. Эти принципы структурообразования направлены на компенсацию или нивелирование определенных недостатков входящих в ПКМ компонентов, чем обеспечивается достижение требуемых для установленных условий эксплуатации показателей их качества. Такой подход к разработке новых ПКМ приводит к тому, что высокий потенциал научной системы чаще всего расходуется на решение частных проблем производства, а выработанные научные и прикладные знания носят скорее индивидуальный, чем универсальный характер. При этом высокая наукоемкость исследований и длительность технологической подготовки производства приводит к неминуемому удорожанию новой продукции, снижению ее конкурентоспособности, а в некоторых случаях запаздыванию новых разработок в динамично развивающихся отраслях их применения. Безусловно, разработки опережающих технологий, основанные на глубоком анализе динамики развития отраслей производства, потребностей областей применения новой продукции и предвидении потенциальных проблем позволяют решить многие научные и производственные задачи, однако, потребность серьезных инвестиций в НИОКР зачастую является основным тормозящим фактором на пути создания и внедрения таких технологий для большинства отраслей промышленности.

Поэтому дальнейшее развитие современного производства ПКМ должно быть основано на использовании новых подходов к их структурообразованию, обеспечивающих достижение высоких показателей трудно сочетаемых свойств композитных изделий, что позволит снизить трудоемкость разработки конструкторско-технологических решений и расширит область их применения. При этом использование существующих технологических методов формования изделий из ПКМ и средств производства позволит обеспечить высокую



экономическую эффективность внедрения новых ПКМ в большинство отраслей промышленности.

Поэтому предлагаемый в диссертационной работе принцип структурообразования волокнистых ПКМ, заключающийся в использовании при их формовании известными технологическими методами наравне с жесткими армирующими материалами специальных материалов, сохраняющих жидкое или эластичное состояние (в работе они носят название «материалы жидкой фазы») и обеспечивающих релаксацию напряжений и подавление нежелательных механизмов разрушения, позволяет решить актуальную межотраслевую проблему создания высокоэффективных материалов на основе волокнистых наполнителей и эпоксидных матриц с применением экономически эффективных технологий формования из них деталей.

Представленные в диссертационной работе результаты выполненных Косенко Е.А. экспериментальных и теоретических исследований позволяют судить о высоком эксплуатационном и технологическом потенциале разработанных ПКМ.

Полученные результаты исследований полностью отвечают **цели диссертационной работы**, которая заключается в разработке научных основ и комплексных решений технологических задач, направленных на создание ПКМ с двухфазной схемой армирования и технологии производства из них деталей, отличающихся высокой долговечностью при действии статических и динамических нагрузок, в том числе при низких отрицательных температурах.

Таким образом, диссертационная работа Косенко Е.А. является актуальной и своевременной, а решенные в ней задачи отвечают потребностям современного производства ПКМ и изделий из них.

## **2. Анализ содержания диссертационной работы, ее завершенность**

**Введение** диссертационной работы позволяет оценить актуальность, научную новизну, теоретическую и практическую значимость выполненных соискателем исследований. Сформулированные в нем научно-технические задачи соответствуют поставленной цели диссертационной работы, для достижения которой соискатель использует современные традиционные и авторские запатентованные методы, методики и методологии исследований. Содержащаяся во введении информация об апробации результатов диссертационного исследования подтверждает высокую степень их достоверности. Положения, выносимые на защиту, соответствуют содержанию диссертационной работы и позволяют оценить ее научную новизну, теоретическую и практическую значимость. Также во введении представлена информация о публикациях соискателя по теме диссертационной работы, ее структуре и объеме, которая позволяет судить о полноте, комплексности и завершенности выполненных в диссертационной работе исследований.

**Первая глава** диссертационной работы представляет собой комплексное теоретическое исследование, направленное на поиск и обоснование новых принципов проектирования структуры волокнисто армированных полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы.



В данной главе соискателем представлены результаты теоретического анализа динамики роста объема производства ПКМ и изделий из них, а также обоснование необходимости расширения областей их применения, в том числе в неблагоприятных климатических условиях, в частности условиях арктического климата, что подтверждает актуальность и своевременность диссертационной работы.

В данной главе диссертационной работы соискателем выполнен анализ существующих наиболее распространенных методов и материалов модификации эпоксидных матриц, результаты которого показали частный характер изменения эксплуатационных свойств полимеров, направленный на улучшение только некоторых из комплекса их свойств, что подтверждает необходимость разработки новых подходов к формированию структуры ПКМ, которые позволят решить актуальную научно-техническую проблему достижения комплекса трудно сочетаемых свойств композитных изделий в том числе в условиях низких отрицательных температур при использовании известных методов формования.

Основываясь на результатах анализа зависимости высоких прочностных характеристик природных слоистых материалов от особенностей их структуры и механизма разрушения соискатель предлагает новый подход к структурообразованию волокнистых ПКМ на основе эпоксидных матриц. Предлагаемый подход заключается в использовании при формировании композитных изделий материала дополнительного армирования, сохраняющего в структуре композита свое исходной жидкое агрегатное состояние, задачей которого подобно жидкому соку в ветвях древесины, является релаксация напряжений, препятствие накоплению дефектов в матрице и подавление нежелательных механизмов разрушения при деформациях. В диссертационной работе эти материалы получили название «материалы жидкой фазы», а композиты с их применением «ПКМ с двухфазной схемой армирования».

Для достижения поставленной цели в данной главе диссертационной работы соискателем выполнен анализ свойств органических материалов, позволяющих создать ПКМ с жидкой фазой армирования. И на основании установленных требований к этим материалам, заключающихся в том, что материал жидкой фазы, сохраняя в структуре композита свое исходной жидкой агрегатное состояние не должен вступать в химическое и межмолекулярное взаимодействие с материалом связующего, потенциально пригодными для использования в качестве жидкой фазы матрицы соискателем были выбраны мономеры, эластомеры и олигомеры.

**Во второй главе** диссертационной работы представлены объекты и методы исследований. В качестве объектов исследований соискателем использовались углепластики и базальтопластики, изготовленные на основе эпоксидных матриц различных марок как российского, так и импортного производства, что позволяет судить об универсальности предлагаемого технического решения. В качестве материалов жидкой фазы в диссертационной работе использовались диметакрилат триэтиленгликоля, силиконовый герметик и синтетический воск. Свойства используемых в диссертационной работе компонентов ПКМ представлены в табличной форме.



В процессе проведения исследований соискателем были использованы современные методы и оборудование для рентгеновской микротомографии и микроанализа, выполнения динамической вискозиметрии, динамического механического анализа, дифференциальной сканирующей колориметрии, инфракрасной спектроскопии, испытаний по оценке адгезионной прочности методом pull-out, а также механических испытаний композитов в условиях влияния нагрузок различного характера и низких отрицательных температур. Для решения методологических задач экспериментальных исследований соискателем были разработаны авторские методы идентификации материала жидкой фазы в структуре композита, выполнения испытаний по оценке жесткости и динамической прочности. На все используемые в работе авторские методы испытаний соискателем получены патенты.

Исследования по оценке трещиностойкости композитов с двухфазной схемой армирования осуществилось на основании результатов их численного моделирования с использованием пакета Ансис.

Таким образом, проведенные в диссертационной работе экспериментальные исследования выполнены на высоком современном уровне. Использование соискателем высокоточного испытательного оборудования позволяет судить о точности и достоверности полученных эмпирических результатов.

**Третья глава** диссертационной работы направлена на изучение кинетики процесса взаимодействия между материалами жидкой фазы различной химической природы и эпоксидной матрицей. Оценка влияния материалов жидкой фазы на свойства эпоксидного связующего осуществлялась на основании результатов анализа изменения реологических характеристик, инфракрасных спектров и адгезионной прочности в системе «эпоксидная матрица-элементарное волокно» эпоксидного связующего при добавлении в него диметакрилата триэтиленгликоля и силиконового герметика.

На основании результатов динамической вискозиметрии, выполненной для эпоксидного связующего и систем эпоксидного связующего при добавлении в него диметакрилат триэтиленгликоля и силиконового герметика в количестве 20 мас. ч., соискателем были определены температуры гелеобразования при трех разных температурах, константы нарастания вязкости и значения энергии активации, относительное изменение которых для исследуемых составов носят незначительный характер. Абсолютное расхождение значений энергий активации, вычисленных по константе нарастания вязкости и обратному времени гелеобразования для исследуемых составов не превышают 9 кДж/моль, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Результаты инфракрасной спектроскопии показали, что использование в качестве материала жидкой фазы силиконового герметика не приводит к образованию водородных связей и смещению полос валентных колебаний, в то время как при использовании диметакрилата триэтиленгликоля образование водородных связей отсутствует при его содержании до 10 мас. ч. и наблюдается очень незначительное уменьшение волновых чисел в диапазоне  $3200-3500\text{см}^{-1}$  при его содержании не менее 20 мас. ч.



При оценке адгезионной прочности в системе «эпоксидное связующее-элементарное волокно» методом pull-out было установлено, что введение в эпоксидное связующее материалов жидкой фазы даже в небольшом количестве (1 мас.ч.) приводит к снижению адгезионной прочности на 13% при использовании диметакрилата триэтиленгликоля и на 20% при использовании силиконового герметика. С увеличением количества используемых материалов жидкой фазы до 20 мас. ч. на 100 мас. ч. эпоксидного связующего адгезионная прочность снижается на 85 и 70% соответственно. При этом работа разрушения, наоборот, увеличивается (на 74-41% и 83-72% при введении в эпоксидное связующее 1-20 мас. ч. диметакрилата триэтиленгликоля и силиконового герметика соответственно). Анализ диаграмм напряжение-деформация и фотографий процесса вытягивания базальтового волокна из эпоксидной матрицы, содержащей материал жидкой фазы, указывает на изменение характера разрушения эпоксидной матрицы с характерного хрупкого на квазипластическое.

По полученным результатам комплекса выполненных исследований соискателем установлено, что при введении в эпоксидное связующее диметакрилата триэтиленгликоля и силиконового герметика в количестве до 20 мас. ч. химическое и межмолекулярное взаимодействие между ними отсутствует, что позволяет их использовать в качестве материалов жидкой фазы дополнительного армирования при выполнении исследований диссертационной работы.

**Четвертая глава** посвящена решению вопросов технологии формования волокнистых ПКМ с двухфазной схемой армирования. В данной части работы представлены подробное описание технологических этапов вакуумформования ПКМ с двухфазной схемой армирования; результаты структурного анализа углепластиков, содержащих материал жидкой фазы; разработка методики идентификации материала жидкой фазы; оценка влияния материала жидкой фазы на прочностные свойства эпоксидной матрицы и исследование изменения температур стеклования ПКМ, армированных материалом жидкой фазы.

Отличительной особенностью разработанной технологии формования ПКМ с двухфазной схемой армирования является наличие операции нанесения материала жидкой фазы на предварительно подготовленный слой (или несколько слоев) препрега (армирующей ткани, пропитанной эпоксидным связующим) в соответствии с заданной схемой и в заданном количестве. На основании результатов структурного анализа углепластиков с двухфазной схемой армирования установлено, что применение исследуемых материалов жидкой фазы приводит к повышению пористости композита до 5,8%.

Для идентификации материала жидкой фазы соискателем разработана методика, основанная на применении метода инфракрасной термографии. Технологической особенностью предлагаемой методики является выполнение неразрушающего контроля в среде постоянного магнитного поля, а также использование в качестве маркеров температурных режимов нагрева характеристической температуры Дебая. Использование постоянного магнитного поля позволяет повысить информативность температурного



диагностического сигнала, а расчет характеристической температуры Дебая и использование этих значений при выборе температурных режимов позволяет предотвратить термическую деструкцию материалов матрицы при выполнении контроля. Также в работе соискателем установлены условия выполнения инфракрасной термографии и время оптимального наблюдения для ПКМ, содержащих материалы жидкой фазы различной химической природы.

Оценка влияния схемы армирования материалом жидкой фазы на изменение жесткости и прочности эпоксидной матрицы осуществлялась на основании результатов испытаний 10 серий образцов, отличающихся углом армирования и количеством материала жидкой фазы. Изготовление образцов с применением биаксиальной углеродной ткани, расположенной перпендикулярно прилагаемой нагрузке, позволило исключить волокна из передачи нагрузки и выполнить оценку изменения контролируемых показателей только эпоксидной матрицы в зависимости от схемы армирования материалом жидкой фазы.

Исследование изменение жесткости осуществлялось по запатентованному соискателем методу при консольном закреплении образца и приложении нагрузки к его свободному концу с определением величины прогиба. Результаты испытаний показали, что жесткость образцов, выраженная через снижение величины суммарного относительного прогиба, при всех исследуемых схемах армирования с увеличением усилия в диапазоне от 0,1 до 0,5 Н – увеличивается. При этом прочность при растяжении исследуемых серий образцов снижается, что, вероятно, связано с особенностями формирования межфазной границы между используемым эпоксидным связующим и силиконовым герметиком, так как при использовании в качестве материала жидкой фазы диметакрилата триэтиленгликоля в дальнейших исследованиях снижение прочности при растяжении не происходит. Установлено, что в наименьшей степени снижение прочности эпоксидной матрицы при растяжении наблюдается у образцов с расположением материала жидкой фазы под углами 0 и +45° к прикладываемой нагрузке. Таким образом, соискателем установлены схемы оптимального расположения материала жидкой фазы для проведения дальнейших механических испытаний.

Исследование изменение температуры стеклования при введении в структуру композита материалов жидкой фазы осуществлялось на образцах базальтопластиков методом дифференциальной сканирующей калориметрии, результаты которой показали, что материал жидкой фазы практически не оказывает влияние на температуру стеклования, что косвенно подтверждает отсутствие влияния используемых материалов жидкой фазы на свойства эпоксидной матрицы.

**В пятой главе** представлены результаты механических испытаний углепластиков с двухфазной схемой армирования по определению прочности при статическом растяжении и ударных нагрузках, а также упругих характеристик (модуля упругости и модуля потерь).

Испытания по оценке прочности при растяжении и ударных нагрузках выполнялись на образцах углепластиков с двухфазной схемой армирования,



изготовленных с применением углеродных лент. Все образцы были разделены на группы по количеству содержания материала жидкой фазы в диапазонах до 5 мас.ч., от 5 до 10 мас. ч. и свыше 10 мас. ч. Перед испытаниями образцы выдерживались при  $-30$  и  $-50^{\circ}\text{C}$  в течение 30 суток. Испытания на растяжение осуществлялись непосредственно при этих же отрицательных температурах. Результаты испытаний показали, что наибольшие значения прочности достигаются при содержании материала жидкой фазы до 5 мас.ч. Использование в качестве материала жидкой фазы диметакрилата триэтиленгликоля позволяет повысить прочность при растяжении и ударных нагрузках при всех исследуемых температурах на 8% и более 30% соответственно. Использование в качестве материала жидкой фазы силиконового герметика позволяет минимизировать потерю прочностных свойств в условиях влияния низких отрицательных температур и повысить ударную прочность на  $\sim 20\%$  после выдержки при комнатной и  $-30^{\circ}\text{C}$ . Аналогичные испытания были выполнены на образцах углепластиков, изготовленных с применением биаксиальных углеродных тканей и полученные результаты имеют хорошую сходимость с результатами испытаний, выполненных на образцах изготовленных с применением углеродных лент, что позволяет обобщить полученные результаты.

Обеспечение материалом жидкой фазы высоких прочностных характеристик в условиях влияния низких отрицательных температур позволяет расширить область применения ПКМ с двухфазной схемой армирования.

На основании результатов комплекса выполненных испытаний соискателем была разработана модель устойчивости ПКМ с двухфазной схемой армирования и определены значения коэффициентов реализации прочности матрицы при использовании в качестве материалов жидкой фазы диметакрилата триэтиленгликоля и силиконового герметика при их различном содержании. Полученные значения коэффициентов позволяют наглядно оценить влияние количества материала жидкой фазы различной химической природы на свойства эпоксидной матрицы.

Результаты ДМА показали, что использование в качестве материала жидкой фазы силиконового герметика практически не оказывает влияния на изменение модуля упругости (модуль упругости базальтопластиков, содержащих в качестве жидкой фазы матрицы снижается на  $\sim 1\ldots 8\%$  в зависимости от его и температуры испытаний). В свою очередь использование диметакрилата триэтиленгликоля приводят к существенному снижению модуля упругости (на  $30\ldots 80\%$  в зависимости от количества материала жидкой фазы и температуры испытаний). Введение в состав композита синтетического воска приводит к снижению модуля упругости на  $7\ldots 20\%$ . Таким образом, исследуемые материалы жидкой фазы оказывают неоднозначное влияние на упруго-прочностные свойства ПКМ, поэтому выбор оптимального материала жидкой фазы должен осуществляться на основании решения задачи многокритериальной оптимизации, критерии оптимальности которой соответствуют заданным условиям эксплуатации, что и было выполнено соискателем в 6 и 7 главах диссертационной работы.



**В шестой главе** выполнено численное моделирование композита с двухфазной схемой армирования и оптимизация материала жидкой фазы методами идеальной точки и равномерной оптимизации при использовании в качестве критериев оптимальности величин потери прочности при влиянии низких отрицательных температур и средних значений прочностных показателей в том числе в условиях низких отрицательных температур.

Моделирование выполнялось для композита, состоящего из трех групп элементов: ортотропного углеродного армирующего материала, изотропной эпоксидной матрицы и материала жидкой фазы. Расчет осуществился для материалов жидкой фазы, отличающихся значением модуля упругости. В созданной зоне расслоения были определены значения максимальных напряжений и коэффициента запаса прочности в вершине трещины, за ней и в материале жидкой фазы. Результаты расчетов показали, что максимальные напряжения наблюдаются в вершине трещины, находящейся в эпоксидной матрице, а наименьшие – в материале жидкой фазы. При этом коэффициент запаса прочности снижается по мере роста модуля упругости материала жидкой фазы.

Результаты расчетов модели, имеющей структуру реального углепластика, показали, что использование материала жидкой фазы с наименьшим модулем упругости (10 МПа) позволяет полностью оставить рост трещины. Увеличение модуля упругости до 500 МПа приводит к медленному росту трещины. Таким образом установлены зависимость трещиностойкости композита с двухфазной схемой армирования от упругих свойств материала жидкой фазы.

Решение задач многокритериальной оптимизации сопровождается алгоритмами поиска оптимального решения при использовании как метода идеальной точки, так и равномерной оптимизации. На основании решения данных задач установлено, что по критериям минимизации прочностных свойств в условиях влияния низких отрицательных температур оптимальным материалом жидкой фазы является силиконовый герметик, а по критериям максимизации прочностных свойств – диметакрилат триэтиленгликоля. Таким образом, только синтетический воск не удовлетворяет заданным критериям оптимальности.

**В седьмой главе** выполнены испытания по оценке длительной прочности углепластиков с двухфазной схемой армирования, а также представлены результаты оценки технико-экономической эффективности применения ПКМ с двухфазной схемой армирования.

Результаты испытаний по оценке изменения длительной прочности осуществились путем приложения циклически изменяющейся нагрузки растяжения при 100, 500 и 1000 циклах нагружения с измерением прочности при растяжении до и после циклического нагружения. Аналогичный принцип оценки изменения прочности был использован при циклическом изгибном нагружении образцов при 100 тыс. циклов нагружения. На основании полученных результатов соискателем установлено, что использование в качестве материалов жидкой фазы диметакрилата триэтиленгликоля и силиконового герметика обеспечивает релаксацию напряжений, что косвенно доказывается



минимизацией разницы между прочностью до и после циклического нагружения как при растяжении, так и при изгибе, а также обеспечивается снижение величины остаточных напряжений для используемых в работе эпоксидных связующих на 10...23% в зависимости от режима отверждения. Это подтверждается результатами моделирования напряженно-деформированного состояния ПКМ при изгибе в условиях действия динамических нагрузок, на основании результатов которого установлено, что нагрузка в материале жидкой фазы почти в 3 раза ниже, чем в углепластике без материала жидкой фазы.

Таким образом, основными причинами повышения прочностных характеристик ПКМ с двухфазной схемой армирования являются способность материала жидкой фазы обеспечивать релаксацию напряжений при деформациях и снижать остаточные напряжения в зонах его локации.

На основании результатов оценки экономических затрат на использование двухфазной схемы армирования при формовании ПКМ и результатов комплекса показателей качества ПКМ с двухфазной схемой армирования с использованием расчетных значений обобщенного показателя функции желательности Харрингтона выполнено обоснование выбора материала жидкой фазы. Установлено, что наилучшим комплексом свойств обладают ПКМ, в которых в качестве материала жидкой фазы использован силиконовый герметик. Существенными недостатками использования в качестве материала жидкой фазы диметакрилата триэтиленгликоля, которые привели к снижению величин обобщенного показателя функции желательности является высокая стоимость данного материала, низкое значение модуля упругости ПКМ и высокое значение потери механических свойств в условиях влияния низких отрицательных температур. При этом данный материал жидкой фазы обеспечивает максимальные среди сравниваемых типов ПКМ прочностные характеристики в том числе в условиях влияния низких отрицательных температур, что следует учитывать при разработке конструкторско-технологического решения формования изделий из ПКМ с двухфазной схемой армирования.

Обеспечение материалом жидкой фазы высокого качества лезвийной обработки ПКМ с двухфазной схемой армирования, достигаемое за счет снижения межволокну трения и сил резания, позволяет достигнуть высокой технологичности и производительности постформовочной обработки данных типов композитов.

Диссертационная работа завершается **заключением**, в котором приведены основные выводы, научные и практические результаты работы, а также направления дальнейших исследований, которые заключаются в расширении типов полимерных матриц и материалов жидкой фазы, применяемых в ПКМ с двухфазной схемой армирования, а также технологических режимов формования композитных изделий из них, повышении технологичности применения материалов жидкой фазы, в частности за счет использования капсулированных материалов, разработке методов структурной и параметрической идентификации фазового состава волокнистых и дисперсно-наполненных композитов в зависимости от химической природы материалов жидкой фазы. Указанные направления дальнейших исследований соискателя



являются логичным продолжением выполненных в диссертационной работе исследований, представляют большой научно-практический интерес и позволяют существенно расширить область научного знания.

**В приложении** содержатся акты по внедрению результатов диссертационной работы в производство и учебный процесс.

### **3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертационной работе**

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертационной работе, подтверждается выполненной соискателем научно-аналитической работы, выявлением актуальной межотраслевой научной проблемы, заключающейся в необходимости создания волокнистых ПКМ, обладающих комплексом уникальных свойств: длительной работоспособностью в условиях статических и динамических нагрузок, в том числе в условиях влияния низких отрицательных температур, – что соответствует задачам государственных и отраслевых программ развития РФ. Основные результаты диссертационной работы внедрены в реальном секторе экономики.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертационной работе, обеспечена применением современных апробированных методик и методов исследований и соответствующего высокоточного испытательного оборудования; применением методов статистического анализа результатов испытаний и численного моделирования ПКМ с двухфазной схемой армирования, что позволило обосновать сформированные в работе выводы и рекомендации.

Представленные результаты исследований и сформулированные выводы свидетельствуют о решении научно-технических задач и достижении поставленной цели диссертационной работы.

Новизна полученных научных результатов и основных выводов диссертационной работы не вызывает сомнений.

### **4. Анализ новизны результатов, обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Представленные в диссертационной работе научные результаты и положения направлены на разработку научных основ проектирования составов композиционных материалов и технологии получения из них изделий, отличающихся ранее недостижимым уникальным комплексом свойств: высокой прочностью при ударном и статическом нагружении в условиях низких отрицательных температур, при длительном воздействии циклических растягивающих и изгибных нагрузок, что достигается за счет использования материала дополнительного армирования (жидкой фазы матрицы), формирующего в структуре ПКМ промежуточный слой пониженной прочности, который обеспечивает локальное изменение прочностных и деформационных свойств в зоне действия внешних нагрузок и подавляет нежелательные механизмы разрушения.



Разработка научных основ проектирования ПКМ с двухфазной схемой армирования и технологии получения из них деталей включает следующие новые положения:

- установление реокинетических зависимостей между материалами жидкой фазы различной химической природы и эпоксидным связующим и обоснование выбора материалов, пригодных для использования в качестве жидкой фазы матрицы.

- установление влияния химической природы материала жидкой фазы в структуре волокнистых полимерных композиционных материалов на изменение их механизма разрушения в зависимости от характера нагрузки, заключающемся в том, что использование в качестве материала жидкой фазы диметакрилата триэтиленгликоля и силиконового герметика приводит к снижению остаточных напряжений, повышению релаксационных свойств и снижению жесткости межфазной границы «элементарное волокно-эпоксидная матрица».

- установление влияния химической природы и количества материала жидкой фазы на изменение деформационно-прочностных характеристик волокнистых ПКМ с двухфазной схемой армирования, заключающемся в том, что повышение прочности при ударных и статических нагрузках, в том числе при низких отрицательных температурах, обеспечивается при содержании материала жидкой фазы в количестве до 5 мас.ч.

- установление влияния схемы армирования материалом жидкой фазы на прочность эпоксидной матрицы, заключающемся в том, что наибольшие показатели прочности и жесткости обеспечиваются при нанесении материала жидкой фазы в направлении действия нагрузки или под углом  $+45^{\circ}\text{C}$ .

Все научные положения и выводы обеспечены согласованностью результатов экспериментальных исследований и численного моделирования напряженно-деформированного состояния ПКМ с двухфазной схемой армирования при действии статических и динамических нагрузок.

Основные результаты диссертационной работы обладают теоретической и практической значимостью.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- разработке теоретических основ управления структурой и свойствами ПКМ в условиях длительного воздействия отрицательных температур и динамического нагружения посредством определения оптимального состава, схем армирования и количества материала жидкой фазы.

- обобщении данных по влиянию материалов жидкой фазы различной химической природы на релаксационные свойства ПКМ, величину остаточных напряжений эпоксидных матриц и накопление повреждений в нагруженных ПКМ с двухфазной схемой армирования.

- разработке модели ПКМ с двухфазной схемой армирования и методики оценки его напряженно-деформированного состояния.

Практическая значимость работы заключается в:

- разработке технологического регламента формования деталей из ПКМ с двухфазной схемой армирования методом вакуумформования с использованием в качестве материала жидкой фазы диметакрилатата триэтиленгликоля.



- определении оптимальных схем армирования материалом жидкой фазы, химической природы и содержания материала жидкой фазы с учетом требований к статической и динамической прочности ПКМ в том числе в условиях влияния низких отрицательных температур.

- разработке методики идентификации материала жидкой фазы в структуре ПКМ, методов оценки изгибной жесткости и динамической прочности ПКМ с двухфазной схемой армирования.

- внедрении результатов диссертационной работы на предприятии ЗАО «Универсал-Аэро» при производстве авиационного и аэродромного оборудования, а также в учебный процесс ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)».

### **5. Соответствие содержания автореферата основным идеям и выводам диссертационной работы, качество оформления автореферата**

Содержание автореферата в полном объеме соответствует основным идеям и выводам диссертационной работы, соответствует ее содержанию и задачам исследования, позволяет оценить научную новизну, теоретическую и практическую значимость.

Объем автореферата достаточен для понимания сути диссертационной работы. Автореферат оформлен в соответствие с предъявляемыми требованиями.

По теме диссертации опубликована 62 научные работы, в российских и международных научных журналах, сборниках конференций, в том числе 34 статьи в изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и доктора наук», 24 работы опубликовано в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus, 1 монография, получено 4 патента на изобретение, которые вместе с авторефератом в полной мере отражают идею и цель диссертационной работы, её основные положения, выводы и рекомендации.

Публикации соискателя по теме диссертации с достаточной степенью полноты отражают содержание и основные результаты диссертационной работы.

### **6. Анализ качества оформления диссертационной работы**

Диссертационная работа написана научным языком в соответствии с правилами академического письма с грамотным применением профессиональной терминологии. Главы диссертационной работы структурированы в логической последовательности. Оформление диссертационной работы соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Диссертация и автореферат Косенко Е.А. соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления. М.: Стандартинформ. – 2012.



## 7. Замечания по диссертационной работе и автореферату

1. В работе соискатель ограничился изучением волокнистых ПКМ с двухфазной схемой армирования, изготовленных с использованием препрегов холодного отверждения, пропитанных эпоксидным связующим. При этом изготовление силовых композитных элементов конструкций, как правило, осуществляется с применением препрегов горячего отверждения на основе различных типов связующих, в том числе расплавных эпоксидных связующих. Так как диссертационная работа направлена на повышение комплекса прочностных свойств волокнистых ПКМ, то желательно было бы включить в объем исследований изучение комплекса свойств ПКМ с двухфазной схемой армирования, изготовленных с применением препрегов горячего отверждения и расширить границы температурных режимов формования.

2. На мой взгляд большой научно-технический задел в направлении диссертационного исследования могли бы составить исследования изменения комплекса свойств ПКМ с двухфазной схемой армирования при использовании диметакрилата триэтиленгликоля, силиконового герметика и синтетического воска различного химического состава.

3. В качестве оценки влияния материалов жидкой фазы на прочностные свойства ПКМ в неблагоприятных эксплуатационных условиях соискателем исследуется влияние только низких отрицательных температур, что немаловажно, но климатические условия арктического бассейна помимо низких отрицательных температур характеризуются высокой влажностью, цикличностью перепада температур и переходом через  $0^{\circ}\text{C}$ . Также существенное влияние на изменение показателей прочности ПКМ оказывает солнечная радиация. В связи с этим было бы желательно расширение объема экспериментальных исследований с учетом факторов влажности, влияния ультрафиолета на изменение свойств ПКМ с двухфазной схемой армирования и выполнение натуральных испытаний.

4. В работе отсутствует ДСК модифицированного диметакрилатом триэтиленгликоля и силиконовым герметиком эпоксидного материала, результаты которой позволяют получить более глубокое представление о свойствах полимеров и, как правило, дополняют результаты реометрии.

5. Непонятно какие процессы приводят к многократному снижению величины теплоемкости базальтопластиков с двухфазной схемой армирования и в то же время отсутствуют при аналогичных испытаниях углепластиков.

6. В части оценки влияния схем армирования на изменение прочностных показателей эпоксидной матрицы не приводится обоснование выбора применяемого количества материала жидкой фазы для каждой из исследуемых схем, а также принцип выбора самих схем.

7. Автором не выполнены исследования по оценке изменения прочностных свойств ПКМ с двухфазной схемой армирования при вариации технологических режимов формования: давления и температуры, результаты которых могли бы позволить расширить потенциальные возможности применения разработанных композитов.



Однако указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

### 8. Заключение

Диссертация Косенко Екатерины Александровны «Волокнистые полимерные композиционные материалы на основе эпоксидной матрицы с двухфазной схемой армирования» является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, предусмотренных Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» и пунктам 2, 6 направлений исследований паспорта научной специальности 2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов.

Автор диссертации, Косенко Екатерина Александровна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов.

#### Официальный оппонент,

Хараев Арсен Мухамедович,

профессор, доктор химических наук

по специальности: 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов,

проректор по организации приема и довузовской деятельности

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

 Арсен Мухамедович Хараев

«08» 10 2024 г.

Должность, ученую степень, ученое звание и подпись Хараева Арсена Мухамедовича заверяю:  
Ученый секретарь КБГУ



 И.В. Ашинова

Адрес: 360004, Россия, КБР, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173,  
телефон +7(8662) 77-32-81, e-mail: am\_charaev@mail.ru,

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»