

ЗАМ. ДИРЕКТОРА
ПО НР
Е.В. ШИЛЬКО

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ИФПМ СО РАН
Е.А. Колубасев

« 20 » 2026 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации ИФПМ СО РАН
на диссертационную работу Вевериса Алниса Александровича
на тему «Структура и свойства термопластичного углепластика
с дисперсно-упрочнённой полиэфирсульфон-полиэфиримидной матрицей»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.6.17 — «Материаловедение»

Актуальность темы исследования не вызывает сомнений и обусловлена сочетанием выбранных объекта и предмета изучения. Так, термопластичные полимерные композиционные материалы (ТПКМ) конструкционного назначения, в частности, армированные непрерывными волокнами, такими, как углеродные, важны как новый класс материалов, позволяющий кратно ускорить производство массовых изделий за счёт новых для композитов производственных методов. При этом, массово описанное в литературе использование полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) как матричного полимера, помимо высоких требований к техническому обеспечению процессов его переработки, сопряжено с проблемами его дефицита и высокой стоимости.

Для применений, не требовательных к химической стойкости используемой полимерной матрицы, возможна замена ПЭЭК на близкие по природе полиарилены, такие, как полиэфирсульфон (ПЭСФ) и полиэфиримид (ПЭИ). Новым подходом, который может обеспечить повышение уровня характеристик этих полимеров для большей конкурентоспособности по отношению с ПЭЭК, может быть использование их смесей, что возможно благодаря способности аморфных полимеров ко взаимному растворению и образованию смесей. Существование растворимости в системе ПЭСФ-ПЭИ позволяет создание смесей не только принудительным смешением в расплаве, но и другими методами, включая смешение растворов этих полимеров или перспективное смешение их порошков в составе водной дисперсии непосредственно в ходе пропитки ею волокон, что ранее не применялось к смесям полимеров.

Таким образом, поставленная автором исследования цель разработки нового термопластичного композиционного материала на основе углеродных волокон и полимерных матриц системы полиэфирсульфон-полиэфиримид, включая методы его получения, для достижения повышенных упруго-прочностных характеристик по сравнению с аналогами на основе однофазной матрицы нацелена на решение стоящей перед отраслью композиционных материалов важной задачи замены ПЭЭК в некритических конструкционных применениях на более доступные материалы.

Основная научная новизна работы отражена в следующих основных тезисах:

1. Экспериментально определена микроструктура пленок бинарных смесей полиэфирсульфон-полиэфиримид и её зависимость от компонентного состава смеси, определены концентрационные интервалы существования дисперсной микроструктуры при получении смесей осаждением из раствора.

2. Достигнут оптимальный размер частиц дисперсной фазы для смесей полиэфирсульфон-полиэфиримид, не превышающий 10 мкм, который обеспечивает эффект дисперсного упрочнения в матрицах полимерных композиционных материалов.

3. Предложенный метод определения точки помутнения смесей полимеров регистрацией проходящего инфракрасного излучения при переменной температуре позволяет зарегистрировать, в том числе, сдвиг полосы пропускания излучения для смеси по мере нагрева.

4. Показана возможность получения термопластичных препрегов на основе смесей полимеров по методу пропитки волоконной ленты водной суспензией порошков полимеров, ранее использованному только для получения препрегов с однофазной матрицей.

5. Модель Водермайера, известная для описания процесса пропитки волоконных лент водными суспензиями особо мелкодисперсных порошков полимеров, впервые применена для описания процесса на основе крупнодисперсных порошков, определены корректировки для учёта реального гранулометрического состава порошка.

6. Впервые получены массивные образцы термопластичных композиционных материалов на основе смесей полиэфирсульфон-полиэфиримид, использование матрицы с дисперсной микроструктурой привело к получению материала с возросшей на 30 % прочностью при межслойном сдвиге при сопоставимом по отношению к материалам с однофазной матрицей уровне других физико-механических характеристик.

Практическая значимость работы может быть аналогично отражена в форме следующих основных тезисов:

1. Определено, что для смесей полиэфирсульфон-полиэфиримид процессы перехода смесей в однофазное состояние происходят при температурах ниже температур переработки чистых полимеров. Из этого следует, что такие смеси могут перерабатываться в изделия без необходимости отдельной разработки специальных режимов их переработки.

2. Определено, что смеси полиэфирсульфон-полиэфиримид в интервалах массового содержания полиэфиримида от 0 до 10 % и от 90 до 100 % обладают стабильной во времени мелкодисперсной микроструктурой, сохраняющейся с близкой или меньшей дисперсностью в массивных образцах углепластиков, что обеспечивает эффекты дисперсного упрочнения полимерной матрицы.

3. Показано, что для углепластиков на основе смесей полиэфирсульфон-полиэфиримид достигнута адгезионная прочность свыше 90 МПа, не уступающая конкурентным материалам на основе других полиариленов и реактопластичных эпоксидных связующих.

4. Разработан метод получения препрегов и филаментов на основе бинарных смесей полиэфирсульфон-полиэфиримид пропиткой углеродных волокон раствором

полимеров. Для разработанного метода показано, что его критическое ограничение для дальнейшего получения массивных образцов заключается во вскипании остаточного растворителя.

5. Разработан метод получения препрегов и филаментов на основе бинарных смесей полиэфирсульфон-полиэфиримид пропиткой углеродных волокон водной суспензией полимеров. Показано, что ограничение метода состоит в низкой сплошности препрегов при использовании крупнодисперсных порошков полимеров.

6. Разработан состав конструкционного углепластика на основе смеси высокотемпературных полиариленов, позволяющий достичь повышенного уровня упруго-прочностных характеристик, материал может производиться как в форме однонаправленных препрегов, так и композиционных филаментов.

Дополнительно практическая значимость работы подтверждена Актом об использовании результатов, в котором приведены продуктовые названия и артикулы, в нормативно-технологическую документацию на которые включены результаты работы. Это показывает, что результаты работы находятся на этапе коммерциализации и практическая значимость работы оценена действующей производственной компанией.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы:

Потенциальной областью применения разработанных в диссертационной работе материалов является их использование при получении элементов авиационной и ракетно-космической техники благодаря пригодности таких материалов к переработке методами автоматизированной выкладки и намотки, термоформования и сварки. Создание подобных элементов на данный момент разворачивается в Российской Федерации и обладает потребностью в локализованных материалах для замены импортных аналогов, доступность которых значительно ограничена санкционным давлением. Другим из возможных направлений применения разработанного материала является создание негорючих элементов воздухопроводов и пассажирской кабины авиационной техники, так как оба использованных в работе термопласта обладают высоким предельным кислородным индексом и используются как добавки к другим полимерам, снижающие их горючесть или приводящие к самозатуханию.

Разработанные составы и методы получения термопластичных композиционных материалов, которые могут быть отнесены к разработке сквозных технологий как технологий создания новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками в соответствии с указом Президента Российской Федерации от 18.06.2024 № 529, могут быть использованы в рамках работ по разработке технологий создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения, относимых к критическим в соответствии с Указом Президента Российской Федерации «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» (в редакции Указа Президента Российской Федерации от 16.12.2015 № 623).

Разработанные состав углепластика и растворный метод могут быть использованы в организациях, обладающих специализированным оборудованием

для получения термопластичных препрегов по схожей технологии, среди которых можно отметить НИЦ «Курчатовский институт»–ВИАМ как производитель препрегов на основе полисульфонов, что отмечено автором в обзоре литературных источников.

Аналогично, разработанные состав углепластика и суспензионный метод могут быть использованы в организациях, обладающих компетенциями и оборудованием для его применения в собственном производственном процессе. В то время, как известно о работах, проводимых СПбПУ им. Петра Великого и НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» по этой тематике, наиболее целесообразным является дальнейшее развитие результатов работы на базе АО «Препрег-СКМ» (входит в Композитный дивизион ГК Росатом), где автором работы был получен Акт об использовании результатов диссертационной работы, и где на данный момент реализовано промышленное производство термопластичных композитов по суспензионной технологии.

Полученные результаты, методы и подходы могут стать основой для проведения последующих НИР и ОКР, направленных на разработку новых термопластичных полимерных композиционных материалов на основе других смесей полимеров или волокон иной природы, что позволит заменить аналогичные импортные материалы.

Достоверность результатов работы обеспечена применением общепризнанных стандартизованных методик измерений, рациональным выбором современного измерительного оборудования и сопоставимостью с результатами других авторов.

Структура работы:

Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов и списка используемых источников. Работа изложена на 217 страницах, включает 135 рисунков, 50 таблиц и 47 формул. Список используемых источников насчитывает 213 наименований.

Основное содержание работы:

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, показана степень ее разработанности, определены цель исследований и задачи, решение которых необходимо для ее достижения, сформулированы научная новизна, практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе представлен обзор литературных источников по созданию термопластичных композиционных материалов (ТПКМ) в форме полуфабрикатов - однонаправленных препрегов и композиционных филаментов. Особое внимание уделено известным материалам и работам по созданию ТПКМ на основе ПЭСФ и ПЭИ, обоснована их перспективность в качестве замены ПЭЭК. Показана перспективность подхода создания смесей термопластов, включая смеси ПЭСФ-ПЭИ, для повышения характеристик ТПКМ. Как итог обзора, обосновывается необходимость решения задач исследования и уточняется план работ.

Во второй главе представлены методические указания по проводимым исследованиям и испытаниям. Показаны и подробно описаны методы изготовления

изучаемых материалов. Представлены марки использованных материалов и результаты их предварительных испытаний.

В третьей главе описаны результаты исследований фазового состава и превращений в бинарных смесях ПЭСФ-ПЭИ. Показано, что при получении пленок смесей полимеров сушкой из смесей растворов для достижения наиболее полного расслоения, часть составов сохраняет визуальную однородность и относится автором к «критическим» смесям. Для таких смесей автором подтверждено стабильное во времени существование мелкодисперсной микроструктуры, одной регистрируемой температуры стеклования и температуры растворения ниже температуры переработки. По результатам испытаний микрокомпозитов показано, что использование смесей ПЭСФ-ПЭИ для формирования углепластиков положительно сказывается на межфазной адгезионной прочности последних.

В четвертой главе представлены результаты разработки растворного метода получения полуфабрикатов в форме филаментов и препрегов. Для разработанного метода показано соответствие свойств экспериментально полученных филаментов предложенной модели оценки их компонентного состава. Определены оптимальные параметры процесса получения материалов в форме филаментов, достигнута высокая степень реализации свойств исходного волокна. Представлено изменение метода для получения однонаправленных препрегов. Обнаружено, что использование растворного метода актуально только для последующей консолидации малогабаритных образцов, так как влияние остаточного растворителя не позволяет создание массивных образцов ТПКМ, пригодных для проведения испытаний на определение упруго-прочностных характеристик.

В пятой главе представлен метод изготовления однонаправленных препрегов их пропиткой из водной суспензии полимеров и их смесей. Показана зависимость компонентного состава препрегов от концентрации суспензии и скорости получения, приведены принятые меры по стабилизации компонентного состава при получении длинных образцов. Предложены корректировки к существующей модели описания суспензионного процесса для учёта гранулометрического состава порошка полимера, показано соответствие экспериментальных данных интервалу между зависимостями, полученными расчётным методом по исходной модели и модели с предложенными коэффициентами. Продемонстрировано, что получение препрегов возможно даже на основе смесей крупнодисперсных порошков, но такие материалы уступают растворным в сплошности поперечного сечения и равномерности распределения компонентов.

В шестой главе представлен процесс получения массивных образцов ТПКМ. Обнаружено, что уровень свойств материалов сравнения на основе ПЭЭК, претерпевающих кристаллизацию при охлаждении, может регулироваться изменением режимов изотермической выдержки ниже температуры кристаллизации. Показано, что полученные образцы ТПКМ на основе смесей ПЭСФ-ПЭИ обладали дефектами микроструктуры, унаследованными от исходных препрегов. По результатам физико-механических характеристик массивных образцов ТПКМ выявлено, что образцы на основе смесей превосходят однофазные аналоги по ряду характеристик.

В седьмой главе продемонстрировано применение разработанных растворного и суспензионного методов для получения филаментов для 3D-печати с непрерывным

армированием. Показано, что образцы, полученные по растворному методу, обладают неравномерным распределением волокон по площади поперечного сечения, и не соответствуют предъявляемым требованиям по округлости, в то время как их аналоги, полученные пропиткой из суспензий, характеризуются более округлым сечением с высокой округлостью формы. Также выявлено, что процесс суспензионной пропитки жгутов малого номинала значительно отличается от описанного в пятой главе процесса для жгутов большого номинала.

Общие **выводы** по диссертационной работе содержат как теоретические, так и практические результаты проведенных исследований.

По представленной диссертационной работе Вевериса А. А. имеются следующие **замечания**:

– представленные результаты испытаний массивных образцов ТПКМ с различным составом матрицы следовало бы дополнить свойствами не только в направлении армирования, но и поперек него, а также дополнить испытаниями на определение предела прочности и модуля упругости при сжатии;

– в диссертации сообщается, что «достигнут оптимальный размер частиц дисперсной фазы для смесей полиэфирсульфон-полиэфиримид не превышающий 10 мкм, который обеспечивает эффект дисперсного упрочнения в матрицах полимерных композиционных материалов». Традиционно упрочнение реализуется за счет введения упрочняющих частиц, в то время как в работе указанные частицы дисперсной фазы подавляли зарождение и рост трещин. Это, скорее, следует трактовать как повышение трещиностойкости;

– в работе для изготовления однонаправленных препрегов использовали частицы полимера размером порядка 100 мкм. В то же время коммерческие порошки для таких целей выпускают с характерным размером частиц пара десятков микрон. Использование мелкодисперсных частиц позволило бы оценить реально достигаемые характеристики прочности объемных композитов, а не исследовать влияние на свойства неоднородности структуры;

– для полученных в работе филаментов для 3D-печати их пригодность к процессам печати оценена только с позиции технологических требований, а не применением в реальном технологическом процессе экструзионной 3D-печати;

– в диссертационной работе вывод о повышенной адгезионной прочности углепластиков на основе смесей полиэфирсульфон-полиэфиримид относительно аналогов на основе чистого полиэфирсульфона сделан для образца, содержащего 10 % полиэфирсульфона по массе. Было бы более корректно сравнивать материалы с небольшим отклонением компонентного состава матрицы от такового для образца сравнения;

– несмотря на то, что диссертация выполнена по техническим наукам, в выводах приведено очень мало численных значений, что затрудняет понимание конкретных достижений диссертации, в том числе в сравнении с исследованиями других авторов, а также промышленно выпускаемыми марками препрегов.

Заключение:

Сделанные замечания не ставят под сомнение основные выводы

диссертационной работы и не снижают общую положительную оценку работы.

Диссертация может быть признана законченным научным исследованием, выполненным на высоком уровне и посвященным актуальной проблеме. Автореферат и публикации соискателя адекватно и полно отражают содержание диссертации.

Диссертация Вевериса Алниса Александровича на тему «Структура и свойства термопластичного углепластика с дисперсно-упрочнённой полиэфирсульфон-полиэфиримидной матрицей» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 — «Материаловедение», соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в НИТУ МИСИС», а ее автор, Веверис Алнис Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 — «Материаловедение».

Отзыв ведущей организации диссертационной работы Вевериса А. А. рассмотрен и одобрен на заседании Лаборатории механики полимерных композиционных материалов: присутствовало 10 человек, протокол № 10 от 8 апреля 2026 г.

Председатель семинара
Заведующий лабораторией
механики полимерных композиционных материалов
член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор



Панин Сергей Викторович

Секретарь семинара
Научный сотрудник лаборатории
механики полимерных композиционных материалов
кандидат технических наук



Еремин Александр Вячеславович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4, телефон: +7 (3822) 49-18-81, факс: +7 (3822) 49-25-76, e-mail: root@ispms.tomsk.ru, сайт организации: <http://www.ispms.ru>