На правах рукописи

Панов Илья

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С ТРЕБУЕМЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Люкшин Борис Александрович

Официальные оппоненты:

Пономарев Сергей Васильевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Томский государственный университет, отдел механики деформируемого твердого тела Научно-исследовательского института прикладной математики и механики, заведующий отделом

Светашков Александр Андреевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение машиностроения, ведущий научный сотрудник

Кропотин Олег Витальевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», кафедра «Физика», профессор

Защита состоится 21 февраля 2025 года в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.1.1.01», созданного на базе физико-технического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 10 ТГУ, аудитория 407).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ:
https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/3b8fa9ab-58c6-4d29-891d-aa136676d61a

Автореферат разослан «_____» января 2025 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Усанина Анна Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Экспериментально-технологические подходы к разработке новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) связаны с большими затратами (материальными и временными), причем определение физико-механических свойств композитов зачастую требует больших финансовых и временных расходов, нежели получение самих этих материалов. Рациональным является проведение части работ по разработке и исследованию физико-механических свойств новых материалов путем физического и математического моделирования.

В настоящее время большинство исследований в данной области сконцентрировано на решении прямых задач компьютерного моделирования ПКМ, в то время как работ в области решения обратных задач (проектирования) значительно меньше. Это означает, что разработка методов проектирования является актуальной научно-технической проблемой для определения составов новых ПКМ, включая дисперсно-наполненные материалы. Дисперсное армирование меняет тепло-, электро- и др. физические свойства, но при этом обычно ухудшаются механические свойства, поэтому основное внимание в данной работе уделяется контролю деформационно-прочностных свойств.

Цель работы заключается в разработке и реализации метода проектирования дисперсно-наполненных полимерных композитов (ДНПК) с заданными физико-механическими свойствами.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) Провести выбор метода исследования на основе анализа современного состояния подходов:

а) к определению эффективных характеристик дисперсно-наполненных полимерных композитов путем моделирования с использованием аппарата механики деформируемого твердого тела (МДТТ);

б) к созданию композиционных материалов с заданными характеристиками путем компьютерного конструирования.

2) Выполнить постановку и провести решение серии краевых задач теории упругости для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) ДНПК при механических воздействиях.

3) С использованием математического моделирования и проведения физических тестов установить значения эффективных характеристик для применения в качестве опорных точек в пространстве состояний.

4) Получить составы дисперсно-наполненных полимерных композитов (ДНПК) с нужными физико-механическими свойствами на основе данных, полученных в процессе физических или вычислительных экспериментов.

5) Провести сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Цель и задачи соответствуют паспорту специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела по следующим направлениям исследований:

п. 4. Механика композиционных материалов;

п. 5. Мезомеханика многоуровневых сред со структурой;

п. 11. Математическое моделирование поведения дискретных и континуальных деформируемых сред при механических, тепловых, электромагнитных, химических, гравитационных, радиационных и прочих воздействиях;

п. 12. Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела.

Научная новизна. Реализован метод определения эффективных деформационно-прочностных свойств на макроуровне методами математического моделирования поведения стохастически наполненных дисперсными включениями полимерных композитов на мезоуровне, позволяющий оценить влияние управляющих параметров (степень наполнения, средний размер включений, уровень адгезии и т. д.) на эффективные характеристики.

Модифицирован метод проектирования стохастически наполненных дисперсными включениями полимерных композитов с требуемыми механическими и триботехническими характеристиками при наличии односторонних и двусторонних ограничений для решения задач, в которых число управляющих параметров увеличено до трех, и используются опорные точки, полученные в ходе вычислительных и натурных экспериментов. Метод позволяет либо определить значения управляющих параметров (параметров рецептуры), обеспечивающих получение материала с требуемыми свойствами, либо показать, что эти свойства невозможно получить с использованием заданного набора управляющих параметров.

Показано, что метод позволяет решать прикладные задачи определения рецептур материалов антифрикционного назначения, обладающих повышенными механическими и триботехническими характеристиками.

На защиту выносятся следующие научные результаты:

1. Результаты определения эффективных деформационно-прочностных свойств на макроуровне методами математического моделирования поведения стохастически наполненных дисперсными включениями полимерных композитов на мезоуровне.
2. Метод разработки ДНПК с использованием математического моделирования для получения рецептур материалов с требуемыми механическими и триботехническими свойствами.
3. Результаты проектирования ДНПК с нужными механическими и триботехническими характеристиками, полученные с помощью вычислительной механики деформируемого твердого тела и натурных экспериментов.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность базируется на точности математической постановки задачи, применении современных компьютерных методов и программного обеспечения, анализе сходимости сеточного разбиения, сравнении результатов вычислений с аналитическими решениями, использовании экспериментальных данных и сопоставлении с результатами предшествующих исследований.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные и реализованные методами вычислительной механики математические модели позволяют конкретизировать известную связь «состав-структура-свойства» применительно к стохастически наполненным дисперсными включениями полимерным композитам.

Разработанные и реализованные модели и методы позволяют сократить временные и материальные затраты на определение рецептур полимерных композитов (на основе политетрафторэтилена, свервысокомолекулярного полиэтилена, полиимида, полиэфирэфиркетона и полифениленсульфида) с требуемыми эффективными характеристиками.

Метод позволяет выбрать наиболее значимые управляющие параметры для получения рецептур композитов, обеспечивающих достижение заданных эксплуатационных механических и триботехнических свойств и определить значения управляющих параметров, обеспечивающих получение материала с заданными свойствами, или показать, что эти свойства невозможно получить с использованием заданного набора параметров.

Модифицирован способ визуализации результатов моделирования, позволяющий более полно и наглядно отражать степень влияния управляющих параметров на эффективные механические и триботехнические характеристики ДНПК.

Методология и методы исследования. Прямые задачи определения эффективных характеристик ДНПК решались с использованием методов физического и математического моделирования с привлечением аппарата МДТТ и реализации методом конечных элементов (МКЭ) на основе оригинальных программ, в том числе разработанных в лаборатории механики полимерных композиционных материалов (ЛМПКМ) ИФПМ СО РАН.

Обратные задачи определения эффективных характеристик полимерных композитов решались на основе оригинальных программ, в том числе разработанных в ЛМПКМ ИФПМ СО РАН.

Личный вклад автора. Автор данной работы внес личный вклад в выполнение исследований путем проведения экспериментов на специально разработанных моделях в программе, созданной коллективом авторов из лаборатории механики полимерных композиционных материалов ИФПМ СО РАН. Он также провел статистический анализ полученных экспериментальных результатов и опубликовал свои находки и обсуждения в диссертации, а также обобщил теоретические и экспериментальные результаты. Автор также сотрудничал со своим научным руководителем при постановке задач и обсуждении научных результатов и положений, изложенных в работе. В результате исследования автор написал несколько статей и представил свои результаты в докладах на научных конференциях.

Внедрение работы. Результаты работы были получены и использованы в рамках выполнения прикладных научных исследованиях по проекту Минобрнауки РФ «Разработка с использованием многоуровневых компьютерных моделей иерархически армированных гетеромодульных

экструдируемых твердосмазочных нанокомпозитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для применения в узлах трения и футеровки деталей машин и механизмов, работающих в условиях Крайнего Севера» (2017–2018 гг.).

Связь работы с научными программами и темами. Диссертационная работа выполнена в Национально-исследовательском Томском государственном университете, а также в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН, в соответствии с планами государственных и отраслевых научных программ: 1) РФФИ 16-48-700192 р_а «Научные основы создания многоуровневых твердосмазочных экструдируемых, антифрикционных композитов на базе перспективных термопластичных полимеров для медицины и машиностроения» (2016–2018 гг.); 2) грант РНФ № 21-19-00741 «Развитие метода УЗ-консолидации слоистых волоконно-армированных композитов на основе перспективных термопластичных матриц ПЭЭК и ПЭИ» (2021–2023 гг.); 3) Гранта Министерства науки и высшего образования РФ FSWM-2022-0018 «Научно-технологические основы создания на базе полупроводниковых HR-GaAs:Cr структур мультиспектральных детекторов ионизирующего излучения» (2022–2024 гг.).

Результаты диссертации используются в учебном процессе на кафедре механики и графики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники при подготовке образовательных дисциплин «Механика композиционных материалов», «Механика и технологии», «Прикладная механика», а также в отделении материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета в рамках магистерской подготовки по дисциплине «Современные проблемы наук о материалах и процессах».

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 13 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 5 статей в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих Web of Science, 1 глава в коллективной монографии, представленной в серийном издании, входящем в Scopus; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на 9 международных, 4 всероссийских конференциях, в том числе: Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2016), 7-й всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского (Москва, 2017), Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий

и надежных конструкций» (Томск, 2017), Международных конференций «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» и «Химия нефти и газа» в рамках Международного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2018), XII Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2018), Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию основания института химии нефти «Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа» (Томск, 2019), XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019), Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения основателя и первого директора ИФПМ СО РАН академика Виктора Евгеньевича Панина в рамках Международного междисциплинарного симпозиума "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций" (Томск, 2020), Международной конференции «Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (Томск, 2021), V Международной конференции с элементами научной школы «Новые материалы и технологии в условиях Арктики» (Якутск, 2022), Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Нанотехнологии. Информация. Радиотехника (НИР-23)» (Омск, 2023), Международной конференции «Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (Томск, 2023).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 134 источника. Объем диссертационной работы составляет 118 страниц. Работа иллюстрирована 61 рисунком и 12 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава «Современное состояние и проблемы применения компьютерного конструирования дисперсно-наполненных полимерных композитов с заданными свойствами».

В главе проанализированы актуальные результаты российских и зарубежных авторов по тематике исследований и дана общая характеристика современного состояния в сфере компьютерного моделирования и конструирования полимерных композиционных материалов.

На основе проведенного анализа современного состояния, предлагается использование общей схемы метода компьютерного конструирования, которая состоит из двух основных этапов.

1) Получение данных о свойствах материалов на основе математического моделирования (прямая задача) или экспериментальных данных.

2) Решение обратной задачи - с целью определения определяющих параметров.

Детальная схема показана на рисунке 1.

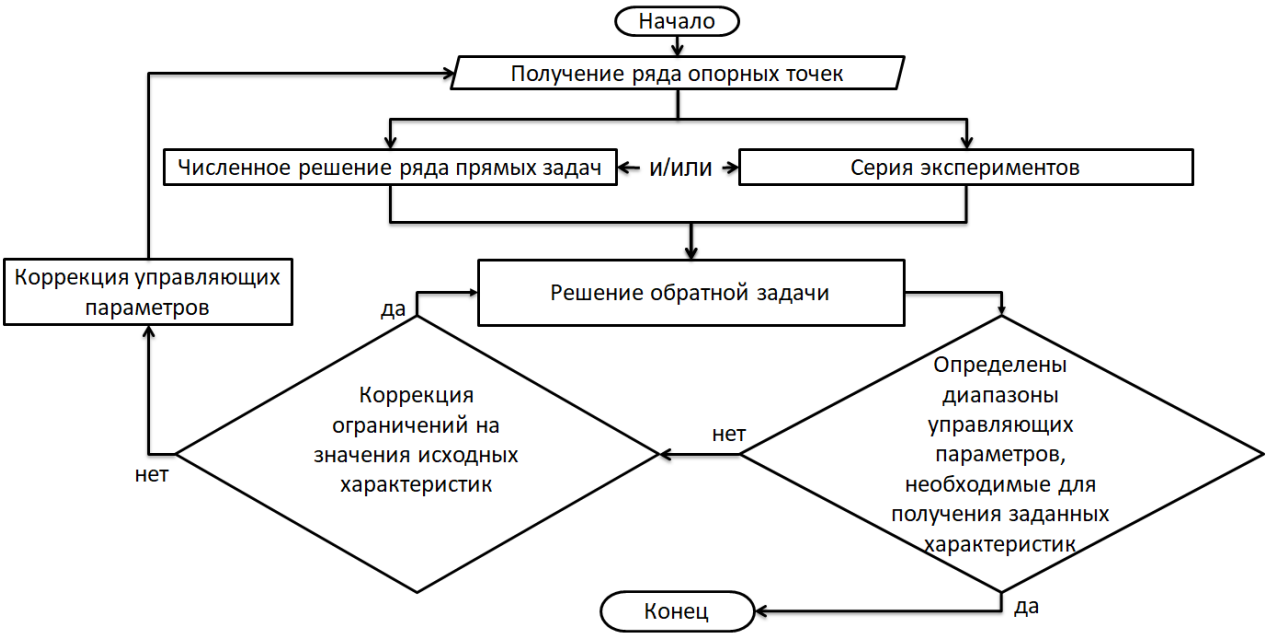


Рисунок 1 – Методика компьютерного конструирования дисперсно-наполненных композиционных материалов с требуемыми свойствами

На рисунке 1 показано, что проектирование дисперсно-наполненных полимерных композитов с требуемыми свойствами может опираться как на экспериментальные, так и на вычислительные данные или использовать их совместно.

Во второй главе «Задачи моделирования и проектирования наполненных полимерных композитов» предложен подход к компьютерному конструированию ДНПК (рисунок 1). С целью реализации предложенного подхода изложены физическая и математическая постановка решения прямых задач компьютерного конструирования материалов, методы их численной реализации, описание метода конечных элементов.

Уравнения равновесия в плоском случае (плоское напряженное состояние) имеют вид:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0, \qquad (i,j) = (1,2)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, x_j – координаты.

Уравнения связи между напряжениями и деформациями, которые в общем случае могут быть различными при расчете конструкций из разных композитов

$$\sigma_{ij} = F(\varepsilon_{kl}),\ (i,j,k,l) = (1,2)$$

где F – функция, связывающая компоненты деформаций и напряжений, имеющая для каждого случая деформирования определенный вид. В упругом случае это закон Гука для линейного изотропного тела:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu\sigma_y\right], \quad \gamma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)}\tau_{xy}, \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \nu\sigma_x\right]$$

E и ν суть технические упругие постоянные, модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

Соотношения Коши в случае малых деформаций между компонентами тензора перемещений и деформаций:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right), \qquad (i,j) = (1,2)$$

где ε_{ij} – компоненты тензора напряжений, x_i, x_j - координаты, U_1 – перемещение в направлении оси OX, U_2 – перемещение в направлении оси OY.

В случае прямоугольной расчетной области граничные условия:

На верхней границе задано перемещение вдоль нормали, касательные напряжения отсутствуют

$$U_2 = U^*, \tau = 0.$$

Боковые границы остаются свободными, на нижней границе перемещения отсутствуют $U_1 = U_2 = 0$.

Решение строится методом конечных элементов на основе вариационного принципа Лагранжа. Для этого используется выражение для полной потенциальной энергии:

$$\Pi = \sum_{e=0}^{E}\left[\int_{V^{(e)}} \frac{1}{2}\{U\}^T\left[B^{(e)}\right]^T\left[D^{(e)}\right]\left[B^{(e)}\right]\{U\}dV - \int_{V^{(e)}}\{U\}^T\left[B^{(e)}\right]\left[D^{(e)}\right]\left\{\varepsilon_0^{(e)}\right\}dV\right]$$

$$- \int_{V^{(e)}}\{U\}^T\left[N^{(e)}\right]^T\begin{Bmatrix} X^{(e)} \\ Y^{(e)} \\ Z^{(e)}\end{Bmatrix}dV - \int_{S^{(e)}}\{U\}^T\left[N^{(e)}\right]^T\begin{Bmatrix} p_x^{(e)} \\ p_y^{(e)} \\ p_z^{(e)}\end{Bmatrix}dS - \{U\}^T\{P\}$$

После введения конечно-элементной сетки и соответствующих сеточных функций перемещений система линейных уравнений относительно перемещений получается из условия минимума потенциальной энергии.

Система уравнений решается методом исключения Гаусса.

Процедура решения с учетом физической нелинейности заключается в следующем: с использованием инкрементальной теории (теории приращений) путь деформирования представляется в виде последовательности равновесных состояний.

$$\Omega^{(0)}, \Omega^{(1)}, \ldots, \Omega^{(N)}, \Omega^{(N+1)}, \ldots, \Omega^{(F)}$$

Если $\Omega(N)$ — некоторое произвольное промежуточное состояние, а все параметры, характеризующие деформируемую систему, известны для состояния с номером N, то задача сводится к определению параметров системы для состояния N+1. Предполагая, что два смежных состояния с номерами N и

N+1 достаточно близки друг к другу, можно все определяющие соотношения линеаризовать по отношению к приращению переменных состояния.

Рассмотрен композит на основе свервысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), наполненного порошком меди, со следующими свойствами (справочные данные): 1) Матрица (СВМПЭ) – модуль Юнга 570 МПа, коэффициент Пуассона – 0.3; 2) Включения (частицы меди) модуль Юнга 110 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.3.

В ходе численного эксперимента были получены зависимости модуля Юнга и предельной деформации разрушения от степени наполнения, среднего радиуса включений и уровня адгезии матрицы к включениям.

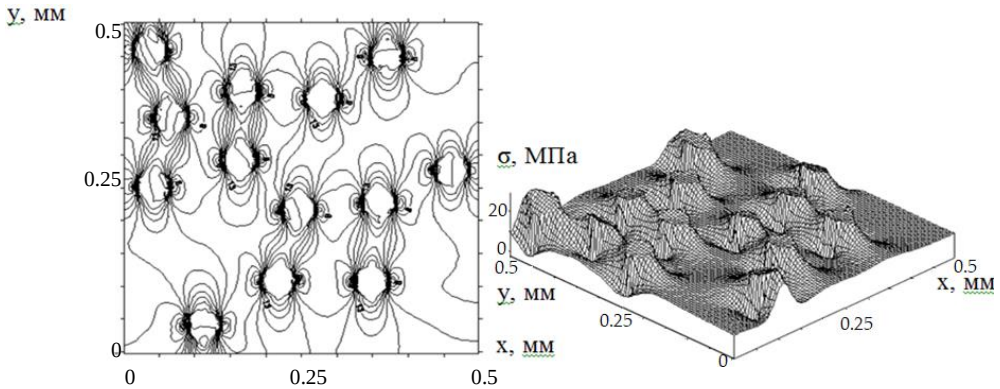


Рисунок 2 – Распределение интенсивностей напряжений в представительном объеме дисперсно-наполненного полимерного композита; радиус включений 25 мкм; степень наполнения 10%; уровень адгезии 20 МПа

По данным расчетов получены распределения интенсивностей напряжений и деформаций для различных радиусов включений (15, 20, 25 мкм), степеней наполнения (10, 20, 30%) и уровней адгезии (10, 20, 30 МПа). В качестве примера в таблице 1 приведены значения предельной деформации разрушения (%) в зависимости от степени наполнения и уровня адгезии при фиксированном радиусе включений R=15 мкм.

Таблица 1 – Зависимость предельной деформации разрушения (%) от степени наполнения φ (%) и уровня адгезии kr (МПа) при радиусе включений R=15 мкм

φ, % / kr, МПа	10	20	30
10	0,769	0,618	0,370
20	1,610	1,242	0,739
30	2,416	1,866	1,066

Предельная деформация разрушения вычислялась из условия нарушения сплошности материала - достижение интенсивностью нормальных напряжений σ_i предельных значений в элементах, прилегающих к жесткому включению $\sigma_i \geq [\sigma]$ (критерий наибольших нормальных напряжений).

Таким образом, реализованные модели позволили сделать количественные оценки влияния несовершенного контакта между матрицей и включениями на эффективный модуль упругости и предельную деформацию разрушения применительно к композиту на основе СВМПЭ, наполненной медным порошком.

Показано, что для рассмотренного композита «СВМПЭ+медь» модуль упругости растет с увеличением степени наполнения, падает с увеличением радиуса включений и не зависит от уровня адгезии, а предельная деформация при растяжении растет при уменьшении степени наполнения и увеличении уровня адгезии и радиуса включений.

В третьей главе рассматривается задача компьютерного конструирования наполненных полимерных композитов с заданными свойствами на основе данных, полученных решением ряда прямых задач.

На основе результатов, полученных при реализации прямых задач, далее решалась обратная задача: определить степень наполнения и значение уровня адгезии, обеспечивающих требуемые значения эффективных характеристик ДНПК: 1) модуль Юнга - от 760 до 900 МПа; 2) предельная деформация - от 0,7 до 1,5 %.

Решение обратной задачи проводится в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3.

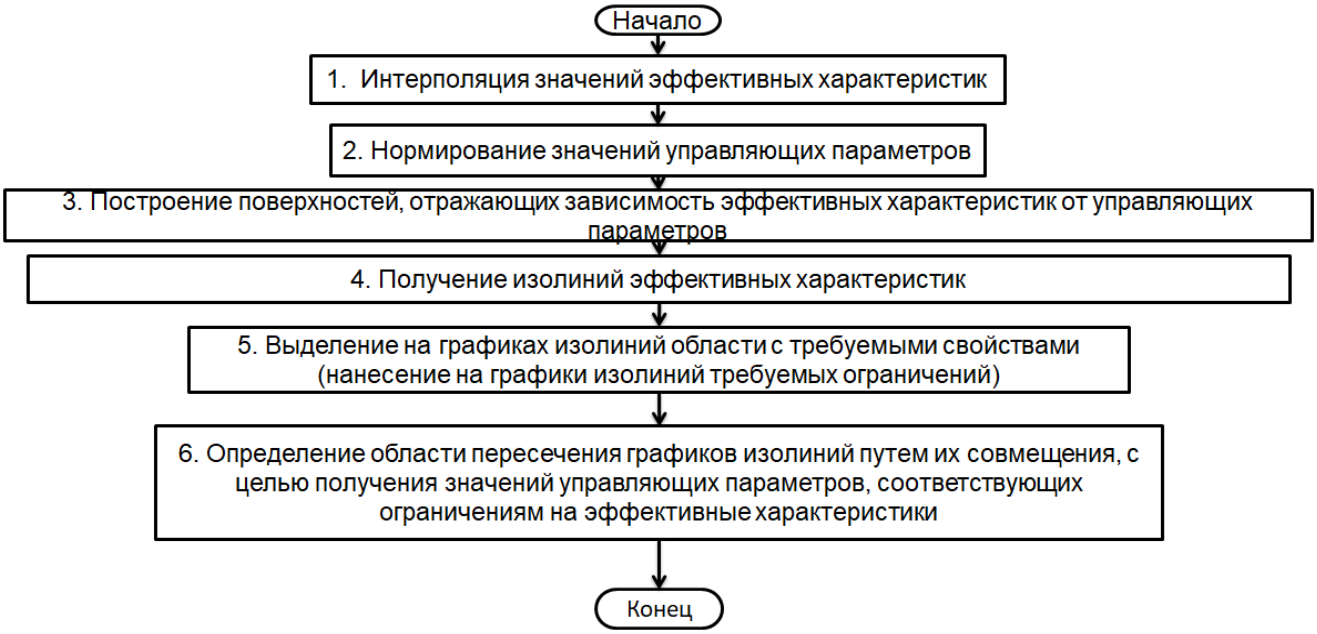
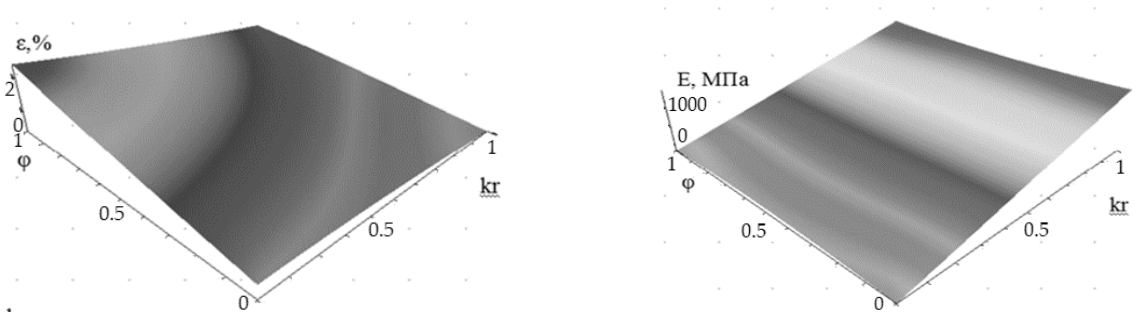


Рисунок 3 – Алгоритм решения задачи проектирования

Результаты, представленные в таблице, служат опорными точками, по которым строятся непрерывные функции, отражающие зависимости модуля Юнга и предельной деформации от двух управляющих параметров (степень наполнения и уровень адгезии) с использованием полинома Лагранжа.

С использованием этих функций в пространстве состояний строятся поверхности для отклика эффективных характеристик на значения управляющих параметров (рисунок 4).

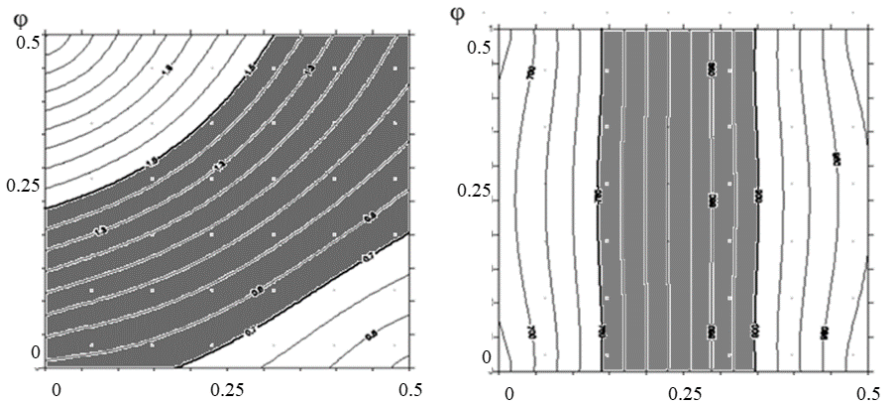
Увеличение степени наполнения приводит к уменьшению предельной деформации разрушения при растяжении, что вполне согласуется с эффектами локализации деформаций и концентрации напряжений. Кроме того, увеличение уровня адгезии приводит к росту предельной деформации (разрушения) композита, что связано с увеличением прочности взаимодействия включений с матрицей.



(а) (б)

Рисунок 4 – Зависимость предельной деформации разрушения ε (а) при растяжении и модуля Юнга *E* (б) от степени наполнения φ и уровня адгезии *k*r при фиксированном радиусе включений 15 мкм

После построения изолиний на плоскости управляющих параметров определяются области, обеспечивающие попадание эффективных характеристик в заданные интервалы. На рисунке 5 эти области показаны в виде цветных полос.



а) б)

Рисунок 5 – Зависимость предельной деформации разрушения ε (а) при растяжении и модуля Юнга *E* (б) от степени наполнения φ и уровня адгезии *k*r при радиусе включений 15 мкм

Пересечение этих полос определяет область управляющих параметров, выводящих одновременно две эффективные характеристики в заданные интервалы (рисунок 6). С практической точки зрения рационально выбирать значения управляющих параметров как можно дальше от границ полученной

области, чтобы случайные отклонения не вывели за ее пределы: 1) степень наполнения – 0,4 %; 2) уровень адгезии – 0,5 МПа.

Проводя аналогичные построения для трех различных значений радиусов включений 15, 20 и 25 мкм (рисунок 7), можно получить трехмерную область в пространстве состояний, где координатами (управляющими параметрами) служат степень наполнения, уровень адгезии, радиус включений (рисунок 8).

Таким образом, реализованные модели позволили сделать количественные оценки влияния несовершенного контакта между матрицей и включениями на эффективный модуль упругости и предельную деформацию разрушения применительно к композиту на основе СВМПЭ, наполненного медным порошком.

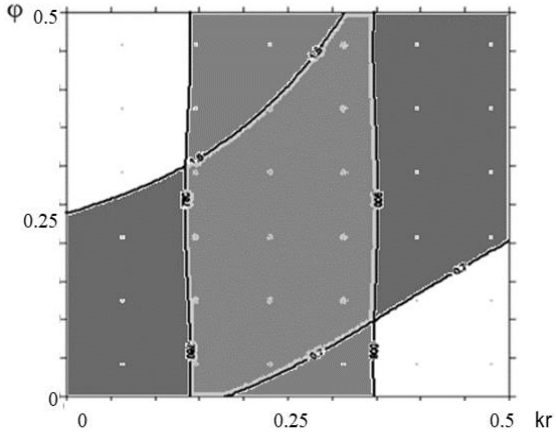
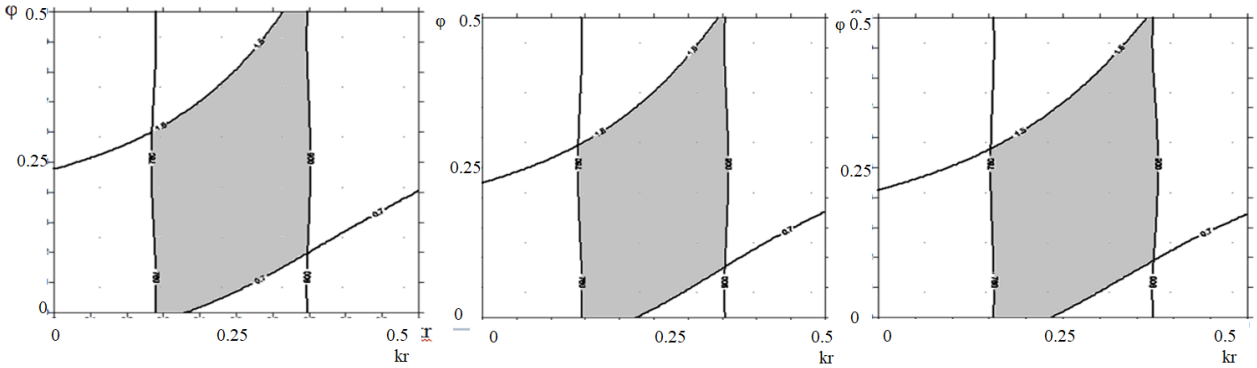


Рисунок 6 – Пересечение полос в области управляющих параметров



а) б) в)

Рисунок 7 – Область значений управляющих параметров (степень наполнения и уровень адгезии) при радиусе включений 15 (а), 20 (б) и 25 (в) мкм

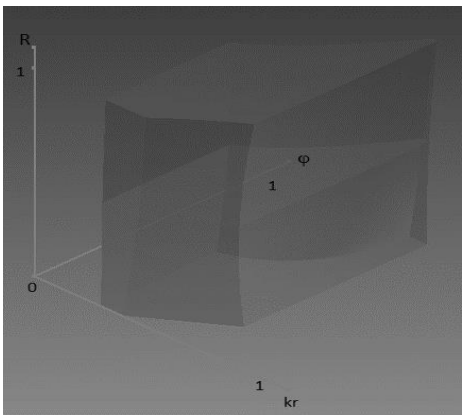


Рисунок 8 – Трехмерная область в пространстве состояний

К полученным численным результатам применен разработанный алгоритм решения обратной задачи компьютерного конструирования ДНПК с требуемыми свойствами (на основе *численных экспериментов*) применительно к *двум и трем* управляющим параметрам (рисунок 8), обеспечивающий получение материала с требуемыми эффективными физико-механическими характеристиками (модуль Юнга и предельная деформация разрушения).

В четвертой главе разработанный алгоритм применен к компьютерному конструированию наполненных полимерных композитов с заданными свойствами на основе данных, полученных *экспериментально.*

Приведено несколько примеров решения обратных задач компьютерного конструирования наполненных полимерных композитов на основе СВМПЭ, политетрафторэтилена (ПТФЭ), полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), полифенилсульфида (ПФС) с различными армирующими и антифрикционными добавками.

Пример 1. Разработка композита на основе СВМПЭ, наполненного стекловолокном, с заданными трибологическими и механическими характеристиками.

Требования к композиту сформулированы в виде односторонних ограничений 1-9: 1) Ударная вязкость по Шарпи a_k > 75 кДж/м^2, 2) Модуль упругости при растяжении E > 1000 МПа; 3) Предел текучести при растяжении σ_t > 21 МПа; 4) Предел прочности при растяжении σ_U > 30 МПа; 5) Удлинение при разрыве ε > 215%; 6) Коэффициент трения («Шар-по-диску») f < 0,14; 7) Интенсивность износа («Вал-колодка», Режим: P=60 Н и V=0.3 м/с) I < 5.9*10^{-5} мм^3/час; 8) Интенсивность износа («Вал-колодка»; Режим: P=140 Н и V=0,5 м/с) I < 50*10^{-5} мм^3/час; 9) Интенсивность абразивного износа: I < 0,065 мм^3/м.

Для создания композита с требуемыми свойствами были выбраны следующие диапазоны значений управляющих параметров:

– Размеры порошка СВМПЭ – от 5 до 330 нм;

– Длина стекловолокна - от 200 до 3000 нм.

Данные о зависимостях характеристик композита от управляющих параметров были получены в ходе экспериментов сотрудниками лаборатории механики полимерных композиционных материалов ИФПМ СО РАН.

Использовалась следующая длина стекловолокна – 200, 300 и 3000 нм. Для неравномерных интервалов (отличающихся на порядки) с целью уменьшения ошибок при интерполяции использовали переход к логарифмический шкале, (ln 200 = 5,3 и ln 3000 = 8). На рисунках 9, 10 показаны области управляющих параметров, при которых выполняются ограничения (1-9). Номер рисунка совпадает с номером ограничения для соответствующей характеристики.

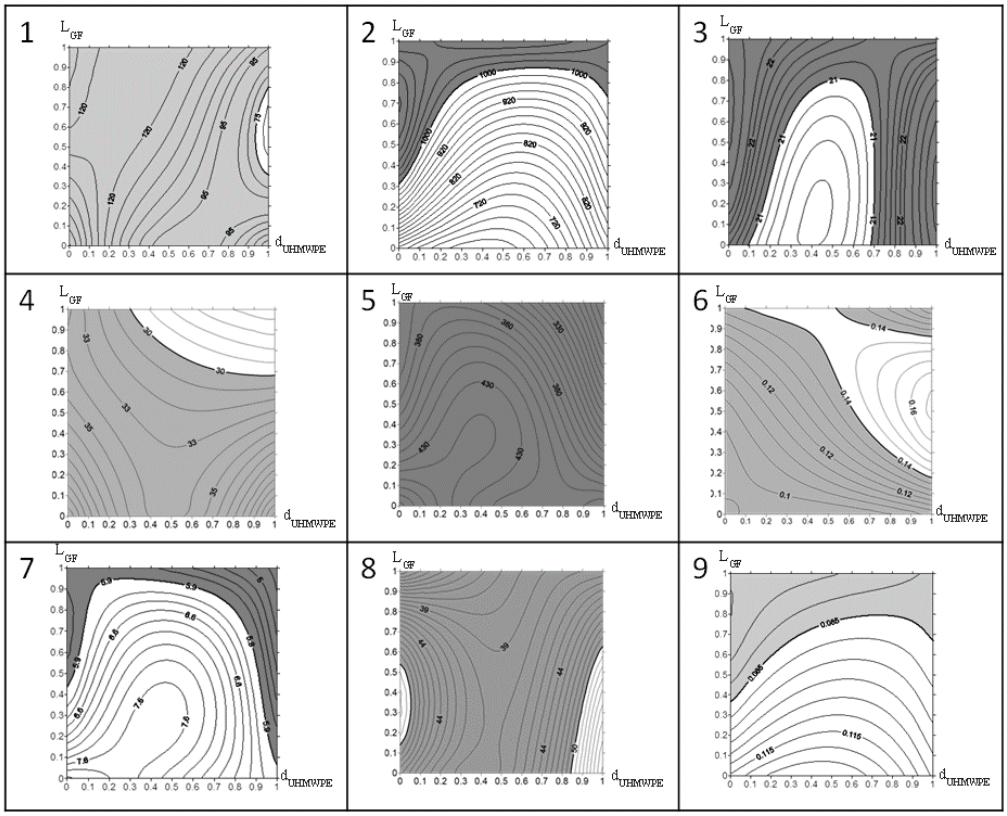


Рисунок 9 – Области управляющих параметров (размеры порошка СВМПЭ и длина стекловолокна), без аппрета, обеспечивающие выполнение ограничений (1-9) для эффективных характеристик

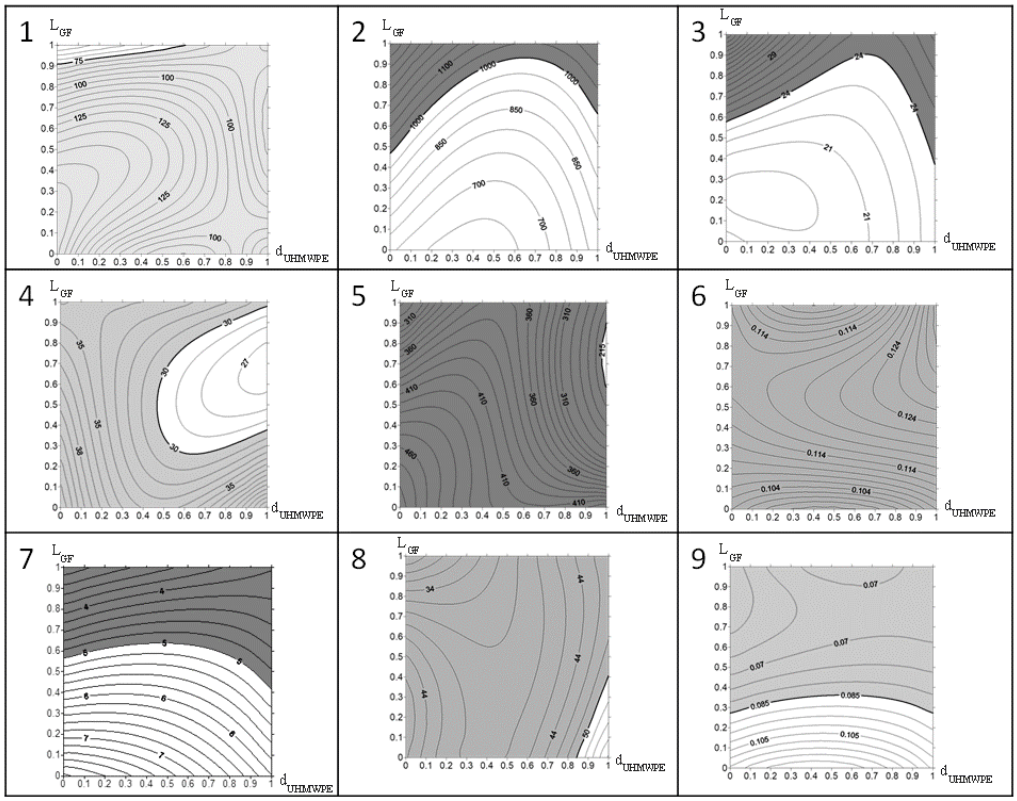
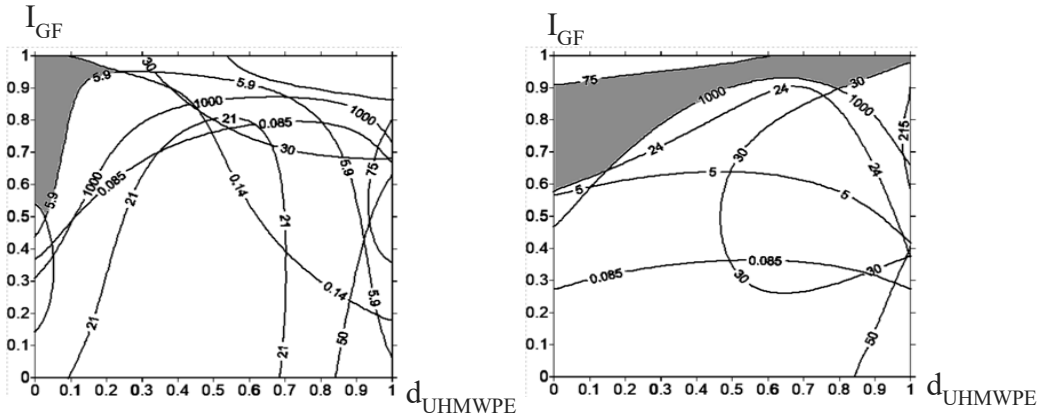


Рисунок 10 – Области управляющих параметров (размеры порошка СВМПЭ и длина стекловолокна), с аппретом, обеспечивающие выполнение ограничений (1-9) для эффективных характеристик

На рисунке 11 показаны пересечения этих областей, позволяющие получить композит с эффективными характеристиками, одновременно удовлетворяющими ограничениям (1-9).



а) б)

Рисунок 11 – Участки, определяющие диаметр порошка СВМПЭ и длину стекловолокна, необходимые для получения композитов с заданными свойствами: без обработки (а), после обработки аппретом (б).

Пример 2. Рассматривается композит на основе СВМПЭ, наполненная микрочастицами волластанита. Изначально для композита, предназначенного

для использования в металлополимерных узлах в “умеренных” условиях трибонагружения, был определен диапазон физико-механических свойств 1-6:

1) модуль упругости при растяжении E > 1050 Мпа; 2) Предел прочности при растяжении σ_U > 30 МПа; 3) удлинение при разрыве ε > 300%; 4) ударная вязкость a_k > 150 кДж/м^2; 5) коэффициент трения f < 0,12; 6) скорость износа («вал-колодка»; режим: P=140 Н и V=0,5 м/с) WF < 0,49*10^{-6} мм^3/м.

Были построены поверхности отклика и соответствующие им изолинии, показывающие зависимость эффективных характеристик образцов на основе СВМПЭ от: 1) степени наполнения волластонитом – от 7 до 23%; 2) предела текучести – от 22,5 до 25,4 МПа.

Полученная область (рисунок 13, а) оказалась слишком мала, чтобы гарантировать возможность получения материала с требуемыми свойствами. Поэтому пороговые значения (1-6) были переопределены следующим образом: 1) модуль упругости при растяжении E > 950 МПа; 2) предел прочности при растяжении σ_U > 35 МПа; 3) удлинение при разрыве ε > 350%; 4) ударная вязкость a_k > 110 кДж/м^2; 5) коэффициент трения f < 0,102; 6) скорость износа (вал-колодка; машина трения 1070 СМТ-1, режим: P=140 Н и V=0,5 м/с) WF < 2,25*10^{-6} мм^3/м. В результате была получена область значений управляющих параметров, показанная на рисунке 13 (б).

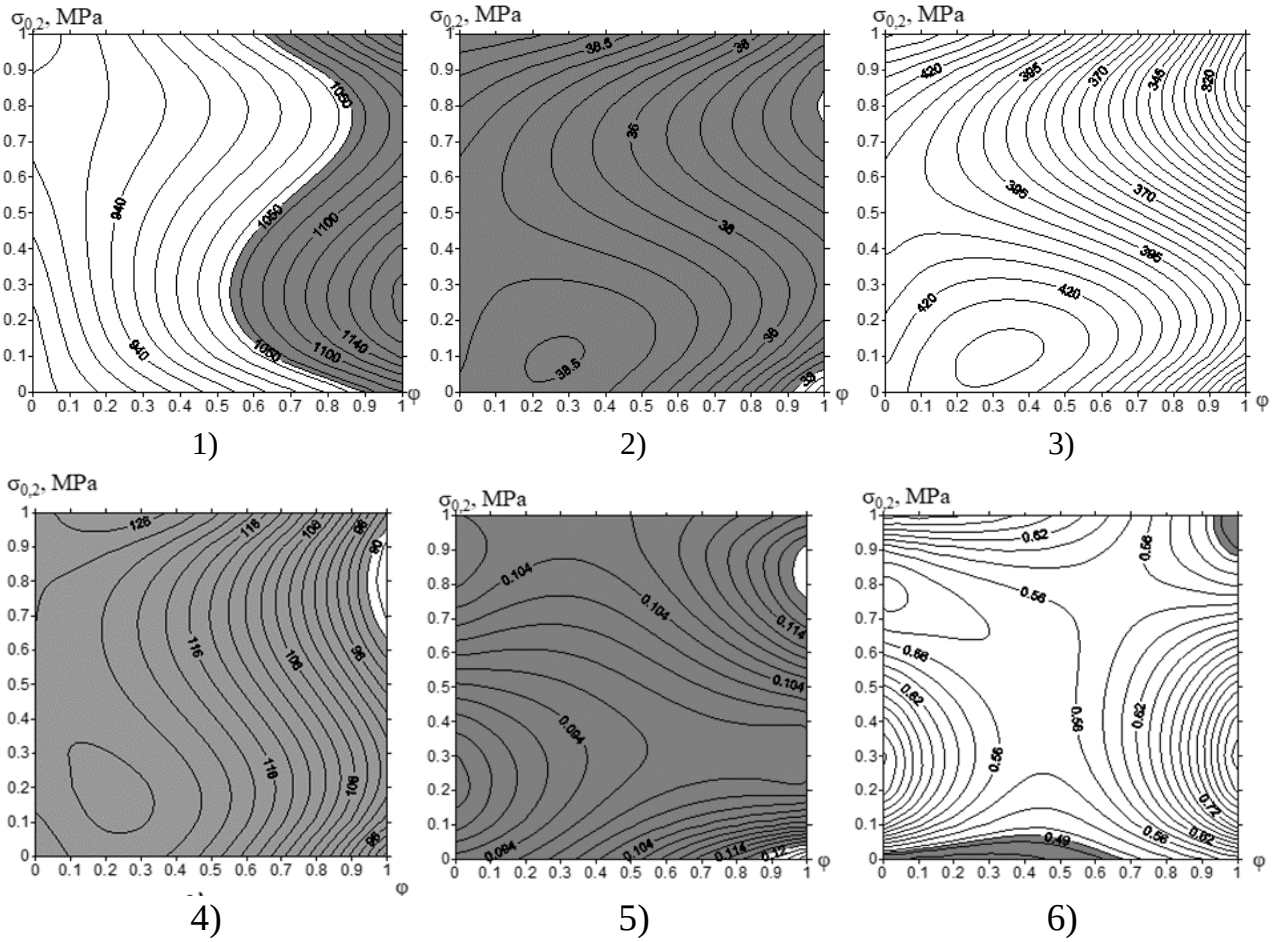
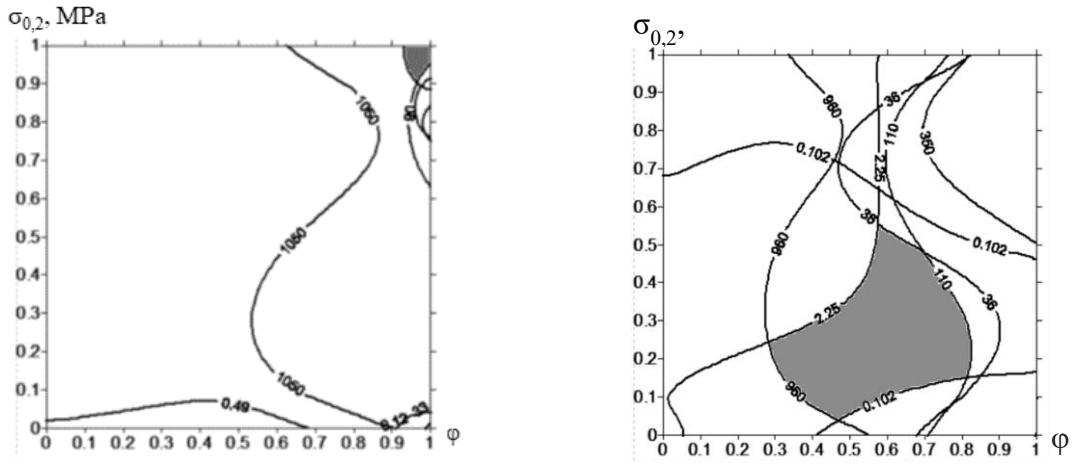


Рисунок 12 – Зависимости E, МПа (1), σВ, МПа (2), ε_B, % (3), A, кДж/м^2 (4), $f_{тр}$ (1), WF (2) от управляющих параметров $\sigma_{0,2}$, МПа и φ



а) б)

Рисунок 13 – Область значений управляющих параметров, обеспечивающих соответствие физико-механических характеристик материала заданным ограничениям

Пример 3. В качестве компьютерного конструирования ПКМ по трем управляющим параметрам рассмотрен пример композита на основе СВМПЭ, армированного дискретными стекловолокнами.

Требования: 1) ударная вязкость a_k >75 кДж/м^2; модуль упругости при растяжении E >1000 МПа.

В качестве управляющих параметров выбраны: 1) средние размеры порошка сверхвысокомолекулярного полиэтилена (7.5, 150, 330 мкм); 2) длина стекловолокон (0 – отсутствие волокон, 200, 3000 мкм). 3) Уровень адгезионного взаимодействия между матрицей и включениями. Пересечения областей для разных эффективных характеристик после их наложения друг на друга определяют области управляющих параметров (диаметра порошка сверхвысокомолекулярного полиэтилена, длины стекловолокон, двух уровней адгезии), необходимых для получения композитов с требуемыми свойствами (рисунки 14, 15).

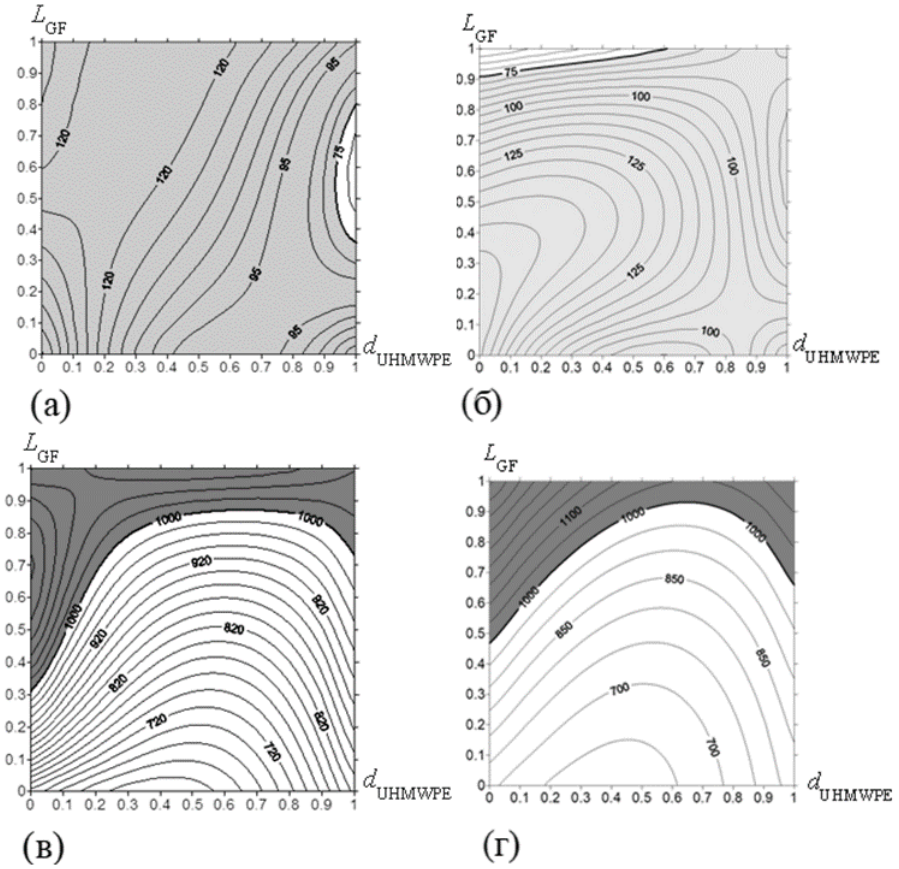


Рисунок 14 – Области изменения управляющих параметров, придающие заданные значения ударной вязкости a_k (кДж/м) (а, б) и модулю упругости E (МПа) (в, г) композита на основе СВМПЭ без аппрета (а, в) и с аппретом (б, г)

На рисунке 16 в виде трехмерного объекта, показанного в двух проекциях, приведена область, внутри которой значения управляющих параметров обеспечивают получение эффективных характеристик, удовлетворяющих заданным ограничениям. Если использовать данные по другим типам аппретов, обеспечивающим иной уровень адгезии, можно дополнить полученную область и на основании ее анализа делать заключения о свойствах армированных композитов, волокна в которых обладают разным уровнем адгезии.

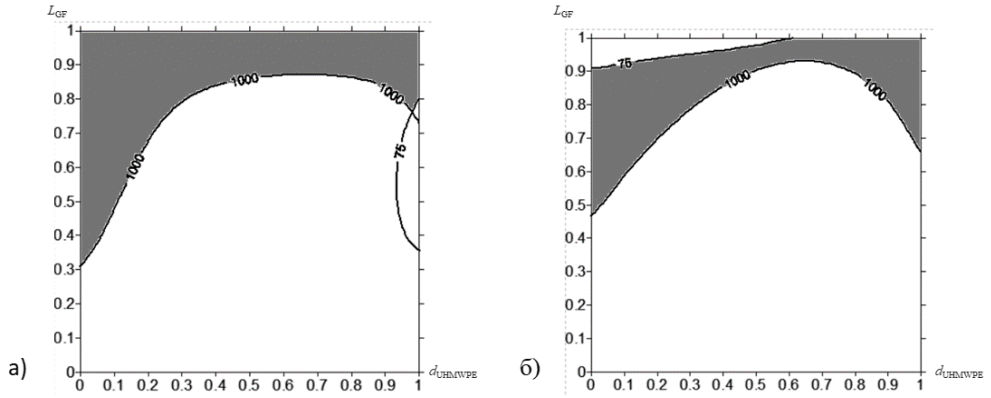


Рисунок 15 – Области, определяющие диаметр порошка СВМПЭ и длину стекловолокон, необходимых для получения композитов с требуемыми свойствами: без аппрета (а), с аппретом (б)

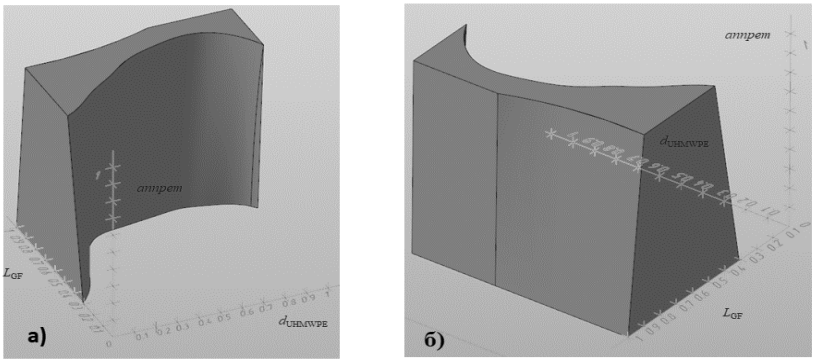


Рисунок 16 – Область допустимых значений трех параметров для создания композита с требуемыми свойствами, представленная с целью повышения наглядности с двух ракурсов (а,б), и полученная на основе экспериментальных данных

В итоге показано, что при использовании ограниченной информации, полученной из экспериментальных данных, в качестве опорных точек на основе решения обратной задачи получена возможность предсказать характеристики разрабатываемых ДНПК.

С целью сравнения полученных результатов с экспериментальными данными проводилась разработка оптимального состава высокопрочных антифрикционных композитов на основе полиимида (ПИ), наполненного ПТФЭ и армированного рубленным углеродным волокном (РУВ), для применения в узлах трения в условиях металло- и керамо-полимерных трибосопряжений.

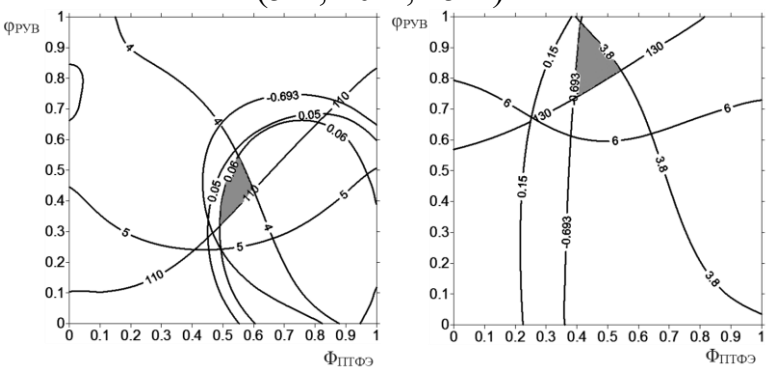
Требования:

1) модуль упругости при растяжении: более 5 ГПа / 6 ГПа;
2) предел прочности при растяжении: более 110 МПа / 130 МПа;
3) удлинение: более 4% / 3,8%;
4) коэффициент трения: менее 0,05 / 0,15;
5) интенсивность износа: менее 0,5×10-6мм3/Н*м / 0,5×10-6 мм3/Н*м;
6) площадь изнашивания контртела: менее 0.06 мм2 / не определено.

В качестве управляющих параметров выбраны:

– степень наполнения РУВ (5%, 10%, 15%);

– степень наполнения ПТФЭ (5%, 10%, 15%).



а) б)

Рисунок 17 – Область, определяющая содержание РУВ и ПТФЭ, необходимых для получения композитов с требуемыми свойствами;
(а) – металло-полимерное, (б) – керамо-полимерное сопряжение

Были изготовлены образцы, для которых определяли механические и трибологические свойства, таблица 2.

Таблица 2 – Физико-механические свойства композитов на основе полиимида

Степень наполнения, %	модуль упругости при растяжении, ГПа	предел прочности при растяжении, МРа	удлинение, %	коэффициент трения	интенсивность износа
ПИ/11.5 ПТФЕ/9.5 РУВ	5,62±0,29	101,9±7,6	3,0±0,3	0.051	0.21±0,02
ПИ/9.5 ПТФЕ/13.5 РУВ	6,65±0,13	135,0±4,9	3,4±0,2	0.098	0.25±0,02

Согласно данным таблицы 2 данные композиты соответствуют всем требованиям к механическим и трибологическим свойствам. При этом более высокое содержание УВ в композите ПИ/9.5 ПТФЕ/13.5 РУВ ожидаемом обусловливает более высокие его прочностные свойства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований и полученных результатов сделаны следующие обобщения и сформулированы выводы по диссертации:

1. Модифицирован метод определения эффективных деформационно-прочностных свойств на макроуровне с использованием математического моделирования поведения стохастически наполненных полимерных композитов на мезоуровне, позволяющий оценить воздействие управляющих параметров (степень наполнения, средний размер включений, уровень адгезии и т.д.) на эффективные характеристики.
2. Показано влияние уровня адгезии между связующим (сверхвысокомолекулярный полиэтилен, СВМПЭ) и дисперсным наполнителем (медный порошок) на эффективный модуль упругости и предельную деформацию разрушения. Для данного композита модуль упругости повашается с ростом степени наполнения дисперсными включениями, немного понижается с увеличением радиуса порошка наполнителя и не зависит от уровня адгезионного взаимодествия. Предельная деформация при растяжении увеличивается при уменьшении степени наполнения дисперсными включениями и повышении уровня адгезионного взаимодествия. Радиус медных порошинок не влияет на предельную деформацию.
3. Модифицированный метод проектирования стохастически наполненных дисперсными включениями полимерных композитов с требуемыми механическими и триботехническими характеристиками при наличии односторонних и двусторонних ограничений использован для решения задач, в которых число управляющих параметров увеличено до трех, и используются опорные точки, полученные в ходе вычислительных и натурных экспериментов применительно к композитам на основе СВМПЭ.

4. Показано, что метод позволяет решать прикладные задачи определения рецептур полимерных композиционных материалов антифрикционного назначения (на основе политетрафторэтилена, свервысокомолекулярного полиэтилена, полиимида, полиэфирэфиркетона и полифениленсульфида), обладающих повышенными механическими и триботехническими характеристиками. Показано, что использование в лабораторных условиях полученных в расчетах рекомендаций по рецептуре позволяет получить композиты, удовлетворяющие заданным требованиям к механическим и триботехническим характеристикам.

5. Показаны преимущества модифицированного подхода, которые заключаются в ясности и возможности использования ограниченного объема исходных данных вычислительного или натурного эксперимента. Этот подход также позволяет исключить случаи, когда требования к характеристикам материала противоречат друг другу и нереализуемы, что проявляется в отсутствии пересечения областей управляющих параметров для анализируемых эффективных характеристик на поверхности отклика.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации

Опыт компьютерного проектирования наполненных композитов высветил ряд возникающих при этом проблем. Ниже перечислены направления, требующие углубления и развития:

1. Уточнение математических моделей и реализация задач в пространственной (3-х мерной) постановке.
2. Приведение результатов экспериментальных исследований в систему, обеспечивающую необходимыми данными процедуру компьютерного проектирования материалов.
3. Распространение подходов компьютерного проектирования на варианты, когда на эффективные свойства одновременно влияет более трех управляющих параметров.
4. На данный момент в математических моделях отражение технологии изготовления происходит косвенно через определенные свойства, такие как матрицы или межфазные слои. Однако требуется создавать модели, которые непосредственно включают эти факторы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Бочкарева С. А. Получение заданных эффективных механических, теплофизических и электрических характеристик композиционных дисперсно наполненных материалов / С. А. Бочкарева, Н. Ю. Гришаева, Б. А. Люкшин, П. А. Люкшин, Н. Ю. Матолыгина, **И. Л. Панов** // Перспективные материалы. – 2017. – № 5. – С. 5–18.– 1,11 / 0,2 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Bochkareva S. A. Obtaining of specified effective mechanical, thermal, and electrical characteristics of composite filled with dispersive materials / S. A. Bochkareva, N. Y. Grishaeva, B. A. Lyukshin, P. A. Lyukshin, N. Y. Matolygina, **I. L. Panov** // Inorganic Materials: Applied Research. – 2017. – Vol. 8, № 5. – P. 651–661. – DOI: 10.1134/S2075113317050070.

2. Панин С. В. Получение рецептуры композиций с заданными свойствами на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена / С. В. Панин, Н. Ю. Гришаева, П. А. Люкшин, Б. А. Люкшин, **И. Л. Панов**, С. А. Бочкарева, Н. Ю. Матолыгина, В. О. Алексенко // Перспективные материалы. – 2018. – № 10. – С. 5–14. – DOI: 10.30791/1028-978X-2018-10-5-14. – 0,73 / 0,1 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Panin S. V. Receiving the Recipe of the Compositions Based on UHMWPE with the Assigned Properties / S. V. Panin, N. Yu. Grishaeva, P. A. Lyukshin, B. A. Lyukshin, **I. L. Panov**, S. A. Bochkareva, N. Yu. Matolygina, V. O. Alexenko // Inorganic Materials: Applied Research, – 2019. – Vol. 10, № 2. – P. 299–304. – DOI: 10.1134/S2075113319020321.

3. Панин С. В. Компьютерный дизайн состава экструдируемых полимер-полимерных СВМПЭ композитов с заданными антифрикционными и механическими свойствами / С. В. Панин, С. А. Бочкарева, Д. Г. Буслович, Л. А. Корниенко, Б. А. Люкшин, **И. Л. Панов**, С. В. Шилько // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 6. – С. 661–672. – 0,77 / 0,15 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Panin S. V. Computer-Aided Design of the Composition of Extrudable Polymer–Polymer UHMWPE Composites with Specified Antifriction and Mechanical Properties / S. V. Panin, S. A. Bochkareva, D. G. Buslovich, **I. L. Panov**, S. V. Shil'ko // Journal of Friction and Wear. – 2019. – Vol. 40, № 6. – P. 501–510. – DOI: 10.3103/S1068366619060199.

4. Бочкарева С. А. Получение композиций с заданным набором физико-механических свойств с использованием трех управляющих параметров / С. А. Бочкарева, Н. Ю. Гришаева, Б. А. Люкшин, **И. Л. Панов**, С. В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 43–50. – 0,67 / 0,15 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Bochkareva S. A. Design of Composites with a Specified Set of Physicomechanical Properties Using Three Control Parameters / S. A. Bochkareva, N. Yu. Grishaeva, B. A. Lyukshin, **I. L. Panov**, S. V. Panin // Physical Mesomechanics. – 2021. – Vol. 24, № 2. – P. 196–201. – DOI: 10.1134/S1029959921020090.

5. Бочкарева С. А. Разработка износостойкого экструдируемого композитного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с заранее заданными свойствами / С. А. Бочкарева, Н. Ю. Гришаева, Д. Г. Буслович, Л. А. Корниенко, Б. А. Люкшин, С. В. Панин, **И. Л. Панов**, Ю. В. Донцов // Механика композитных материалов. – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 27–43. – 0,77 / 0,1 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Bochkareva S. A. Development of a Wear-Resistant Extrudable Composite Material Based on an Ultrahigh-Molecular Polyethylene with Predetermined Properties / S. A. Bochkareva, N. Yu. Grishaeva, D. G. Buslovich, L. A. Kornienko, B. A. Lyukshin, S. V. Panin, **I. L. Panov**, Y. V. Dontsov // Mechanics of Composite Materials. – Vol. 56, № 1. – 2020. – P. 15–26. – DOI: 10.1007/s11029-020-09857-7.

6. Космачев П. В. Влияние плазменной модификации базальтовых волокон на физико-механические характеристики слоистых композитов со связующим из полиэфирэфиркетона / П. В. Космачев, С. В. Панин, **И. Л. Панов**, Л. К. Шаймерденова, А. Е. Винник // Известия вузов. Физика. – 2022. – Т. 65, № 12. – С. 139–145. – DOI: 10.17223/00213411/65/12/139. – 0,45 / 0,1 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Kosmachev P. V. Influence of Plasma Modification of Basalt Fibers on the Physical and Mechanical Characteristics of PEEK-Based Laminates / P. V. Kosmachev, S. V. Panin, **I. L. Panov**, L. K. Shaimerdenova, A. E. Vinnik // Russian Physisc Journal. – Vol. 65, № 12. – 2023. – P. 2193–2200. – DOI: 10.1007/s11182-023-02889-1.

7. Panin S. V. Computer-aided Design of Polymer-based Composites Using Multiscale Models / S. V. Panin, B. A. Lyukshin, N. Yu. Grishaeva, S. A. Bochkareva, **I. L. Panov** // Журнал Сибирского федерального университета. Математика и физика. – № 17 (1). – 2024. – С. 65–74. – 0,77 / 0,2 а.л.

Web of Science: Panin S. V. Computer-aided Design of Polymer-based Composites Using Multiscale Models / S. V. Panin, B. A. Lyukshin, N. Yu. Grishaeva, S. A. Bochkareva, **I. L. Panov** // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – № 17 (1). – 2024. – P. 65–74.

8. Panin S. V. The effect of annealing of milled carbon fibers on the mechanical and tribological properties of solid-lubricant thermoplastic polyimide-based composites / S. V. Panin, J. Luo, V. O. Alexenko, D. G. Buslovich, L. A. Kornienko, S. A. Bochkareva, **I. L. Panov** // Polymer Engineering and Science. – Vol. 60, № 11. – 2020. – P. 2735–2748. – DOI: 10.1002/pen.25504. – 0,8 / 0,1 а.л. (*Web of Science*).

9. Panin S. V. Design of wear-resistant UHMWPE-based Composites Loaded with Wollastonite Microfibers Treated with Various Silane Coupling Agents / S. V. Panin, Q. Huang, V. O. Alexenko, D. G. Buslovich, L. A. Kornienko, F. Berto, S. A. Bochkareva, **I. L. Panov**, N. V. Ryabova // Applied Sciences (Basel). – Vol. 10, is. 13. – 2020. – Article number 4511. – 30 p. – URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/10/13/4511 (access date: 20.04.2024). – DOI: 10.3390/app10134511. – 1,88 / 0,2 а.л. (*Web of Science*).

10. Panin S. V. Effect of Adhesion on Mechanical and Tribological Properties of Glass Fiber Composites, Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Powders with Various Initial Particle Sizes / S. V. Panin, L. A. Kornienko, Q. Huang, D. G. Buslovich, S. A. Bochkareva, V. O. Alexenko, **I. L. Panov**, F. Berto // Materials. – 2020. – Vol. 13, is. 7. – Article number 1602. – 26 p. – URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/13/7/1602 (access date: 20.04.2024). – DOI: 10.3390/ma13071602. – 1,63 / 0,2 а.л. (*Web of Science*).

11. Panin S. V. Material design methodology for optimized wear-resistant thermoplastic-matrix composites based on polyetheretherketone and polyphenylene sulfide / S. V. Panin, B. A. Lyukshin, S. A. Bochkareva, L A. Kornienko, N. D. Anh, L. M. Hiep, **I. L. Panov**, N. Yu. Grishaeva // Materials. – Vol. 13, is. 3. – 2020. – Article number 524. – 22 p. – URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/13/3/524 (access date: 20.04.2024). – DOI: 10.3390/ma13030524. – 1,38 / 0,2 а.л. (*Web of Science*).

12. Kosmachev P. V. Surface Modification of Carbon Fibers by Low-Temperature Plasma with Runaway Electrons for Manufacturing PEEK-Based Laminates / P. V. Kosmachev, S. V. Panin, **I. L. Panov**, S. A. Bochkareva // Materials. – Vol. 15. – 2022. – Article number 7625. – 20 p. – URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/15/21/7625 (access date: 20.04.2024). – DOI: 10.3390/ma15217625. – 1,25 / 0,35 а.л. (*Web of Science*).

13. Kosmachev P. V. Structure and Deformation Behavior of Polyphenylene Sulfide Based Laminates Reinforced with Carbon Fiber Tapes Activated by Cold Atmospheric Plasma / S. V. Panin, **I. L. Panov**, S. A. Bochkareva // Polymers. – 2024. – Vol. 16, is. 1. – Article number 121. – 19 p. – URL: https://www.mdpi.com/2073-4360/16/1/121 (access date: 20.04.2024). – DOI: 10.3390/polym16010121. – 1,19 / 0,3 а.л. (*Web of Science*).

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663824. Программа моделирования расчетной области со случайным расположением включений различной формы для исследования свойств композиционных материалов / Бочкарева С. А. (RU), Люкшин Б. А. (RU), **Панов И. Л.** (KZ), Панин С. В. (RU), Гришаева Н. Ю. (RU); правообладатель: Федеральное государственное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (RU). – заявка № 2021662981; заявл. 19.08.2021; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 24 августа 2021 г.

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science:

15. Panin S. V. Experimental-Theoretical Design of Multicomponent UHMWPE Composites with Prescribed Mechanical and Tribotechnical Properties / S. V. Panin, N. Yu. Grishaeva, P. A. Lyukshin, B. A. Lyukshin, **I. L. Panov**, S. A. Bochkareva, N. Y. Matolygina, V. O. Aleksenko, D. G. Buslovich // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2053 : Proceedings of the 12th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. Ekaterinburg, Russia, May 21–25, 2018. – Article number 030051. – 6 p. – URL: https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2053/1/030051/852334/Experimental-theoretical-design-of-multicomponent (access date: 20.04.2024). – DOI: 10.1063/1.5084412. – 0,35 / 0,05 а.л.

16. Bochkareva S. A. Experimental-theoretical technique for design antifriction polyetheretherketone composites of optimum composition / S. A. Bochkareva, N. Yu. Grishaeva,, B. A. Lyukshin, S. V. Panin, N. Y. Matolygina, A. V. Byakov,

I. L. Panov, D. A. Nguyen // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2051 : Proceedings of the Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures. Tomsk, Russia, October 01–05, 2018. – Article number 020034. – 5 p. – URL: https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2051/1/020034/605559/Experimental-theoretical-technique-for-design (access date: 20.04.2024). – DOI: 10.1063/1.5083277. – 0,36 / 0,05 а.л.

17. Grishaeva N. Yu. Content optimization of polyphenylene sulfide composites filled with carbon fibers of different size / N. Yu. Grishaeva, S. A. Bochkareva, S. V. Panin, L. T. M. Hiep, B. A. Lyukshin, **I. L. Panov**, N. D. Ahn // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167, is. 1 : International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number 020121. – 4 p. – URL: https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2167/1/020121/889359/Content-optimization-of-polyphenylene-sulfide (access date: 20.04.2024). – DOI: 10.1063/1.5131988. – 0,35 / 0,05 а.л.

18. Grishaeva N. Yu. Experimental Study and Multilevel Modeling of Effective Properties of Polyphenylene Sulfide Based 3-Component Composites / N. Yu. Grishaeva, S. V. Panin, S. A. Bochkareva, B. A. Lyukshin, **I. L. Panov**, E. I. Mukhortin L. M. T. Hiep, V. O. Aleksenko, // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167, is. 1 : International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number 020122. – 4 p. – URL: https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2167/1/020122/889641/Experimental-study-and-multilevel-modeling-of (access date: 20.04.2024). – DOI: 10.1063/1.5131989. – 0,35 / 0,05 а.л.

19. Lyukshin B. A. Design of Polymer Composites Based on Visualization of Experimental Data / B. A. Lyukshin, S. A. Bochkareva, L. A. Kornienko, N. Yu. Grishaeva, **I. L. Panov**, D. G. Buslovich, S. V. Panin // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2310 : Proceedings of the international conference on physical mesomechanics. Materials with multilevel hierarchical structure and intelligent manufacturing technology. Tomsk, Russia, October 05–09, 2020. – Article number 020190. – 5 p. – URL: https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2310/1/020190/789681/Design-of-polymer-composites-based-on (access date: 20.04.2024). – DOI: 10.1063/5.0034527. – 0,39 / 0,05 а.л.

Глава в коллективной монографии, представленной в издании, входящем в Scopus:

20. Panin S. V. Experimental and Numerical Studies on the Tensile Strength of Lap Joints of PEEK Plates and CF Fabric Prepregs Formed by Ultrasonic Welding / S. V. Panin, S. A. Bochkareva, **I. L. Panov**, V. O. Alexenko, A. V. Byakov, B. A. Lyukshin // Advanced Structured Materials. – 2023. – Vol. 196 : Progress in Continuum Mechanics. – Chap. 19. – P. 321–354. – DOI: 10.1007/978-3-031-43736-6_19. – 2,06 / 0,35 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
Заказ № 7729 от «27» декабря 2024 г. Тираж 100 экз.
г. Томск, Московский тр. 8, тел. (3822) 53-15-28
publish.tsu.ru