

На правах рукописи



РЕУТОВ АНАТОЛИЙ ИЛЬИЧ

**НАДЕЖНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
С УЧЕТОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ  
ИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Специальности

01.02.06 - динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

ТОМСК 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
Люкшин Борис Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Колмогоров Герман Леонидович

доктор физико-математических наук, профессор  
Радченко Андрей Васильевич

доктор физико-математических наук, профессор  
Скрипняк Владимир Альбертович

Ведущая организация: Институт физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения РАН (ИФПМ СО РАН)

Защита состоится 16 сентября 2011 г. в \_\_\_\_ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.01 при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь совета  
по защите докторских  
и кандидатских диссертаций  
Д 212.269.01



Костюченко Т.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в машиностроении, приборостроении, строительстве и других отраслях народного хозяйства. Использование полимерных материалов снижает вес изделий, повышает производительность труда, обеспечивает экономию материальных и энергетических ресурсов.

В настоящее время в машино- и приборостроении возрастающее применение находят термопласты на основе полипропилена (ПП), обладающие оптимальным сочетанием свойств для различных условий эксплуатации. Это большая номенклатура материалов, включающая в себя базовые марки полипропилена и композиции на его основе: статистические сополимеры, блоксополимеры пропилен с этиленом, наполненные, самозатухающие и морозостойкие композиции на основе ПП.

Полимерные материалы характеризуются значительным, по сравнению с металлами, рассеянием характеристик при их производстве и последующем старении в зависимости от условий эксплуатации.

Оценка надежности изделий и конструкций связана с изучением напряженного состояния и прочности элементов конструкций при изменении деформационно-прочностных и упругих характеристик материала на всех стадиях жизненного цикла изделия.

Особенности поведения полимерных композиционных материалов при внешних воздействиях, данные о рассеянии характеристик материала необходимо учитывать в задачах по определению напряженно-деформированного состояния (НДС) изделий и оценки их надежности.

При изготовлении изделий из термопластов важной проблемой является использование отходов крупнотоннажного производства полимеров и технологических отходов, связанное с совершенствованием технологии производства изделий. Использование отходов переработки при производстве изделий из конструкционных термопластов с учетом требуемого уровня эксплуатационной надежности изделий позволит улучшить экологическую безопасность, увеличить эффективность использования материальных ресурсов и снизить себестоимость изделий.

Расширение сферы применения изделий из полимерных композиционных материалов сдерживается отсутствием научно обоснованного подхода к выбору критериев работоспособности, методов оценки надежности конструктивно сложных изделий, недостаточным опытом их эксплуатации в различных условиях.

Это требует разработки методов и устройств для проведения экспериментальных исследований, учета изменчивости характеристик материала в процессе производства изделий, изучения закономерностей

механических явлений в процессе старения материала при эксплуатации изделий с целью получения объективных данных для прогнозирования надежности изделий.

В связи с этим разработка метода прогнозирования надежности изделий из полимерных композиционных материалов, обоснование, развитие, использование критериев работоспособности и получение оценки надежности конструктивно сложных изделий из полимерных композиционных материалов на этапах проектирования, производства, эксплуатации является актуальной проблемой.

Актуальность работы подтверждается выполнением ее в соответствии с «Межотраслевой программой по использованию отходов производства и потребления полимерных материалов в народном хозяйстве» (1985-1989); региональной программой «Ускорение-90», раздел «Новые материалы»; программой Минвуза РФ «Сертификация» (1994-1995); Межвузовской программы «Архитектура и строительство», раздел 2.1.4. «Научно-обоснованные критерии оценки качества строительных материалов и технологий» (1994-1995), раздел 211.02 «Создание высококачественных строительных материалов и изделий. Разработка ресурсосберегающих экологически безопасных технологий в стройиндустрии» (2003-2004). Работа поддержана РФФИ грантами на проекты «Разработка научных основ и методов реализации задач компьютерного конструирования полимерных композиций» № 05-01-98005 (2005-2006), «Разработка основ и реализация методов вычислительной механики применительно к полимерным композитным материалам с учетом наноструктурных особенностей» № 08-01-00205 (2008-2010).

**Цель работы** состоит в разработке метода прогнозирования надежности изделий и конструкций из полимерных композиционных материалов на этапах проектирования, производства, эксплуатации по критерию конструкционной прочности для нагруженных, армированных изделий и по критерию размерной точности для сопрягаемых деталей.

Для этого были поставлены следующие теоретические и практические задачи:

1. Разработать метод прогнозирования надежности изделий и конструкций, учитывающий результаты экспериментальных исследований изменения деформационно-прочностных и усадочных характеристик материала при технологических и эксплуатационных воздействиях. Создать новые экспериментальные методы и устройства для исследования процессов деформирования и разрушения полимерных композиционных материалов.
2. Разработать и развить вероятностно-статистические модели оценки надежности изделий и конструкций из полимерных композиционных материалов на этапах проектирования, производства и эксплуатации на основе

анализа НДС с учетом изменения деформационно-прочностных и усадочных характеристик материалов.

3. Оценить влияние нестабильности характеристик материала, масштабного фактора, чувствительности материала к концентрации напряжений на надежность изделий по критерию конструкционной прочности на этапе проектирования изделий из полимерных композиционных материалов.

4. Определить влияние режимов переработки материала в изделия и конструкции из ПКМ на деформационно-прочностные, усадочные, дилатометрические характеристики, совершенствовать технологию, связанную с вовлечением производственных отходов ПП в технологический цикл. Оценить влияние изменения этих характеристик материала на надежность изделий по критерию конструкционной прочности и по критерию размерной точности.

5. Получить количественные оценки влияния статистической изменчивости деформационно-прочностных и усадочных характеристик под воздействием климатических факторов на надежность изделий на этапе эксплуатации изделий из полимерных композиционных материалов.

6. Осуществить внедрение результатов исследования в производство.

#### **Объекты и методы их исследования.**

Надежность изделий и конструкций (трубопроводов, элементов запорной арматуры, стержневых перемычек и др.) из конструкционных термопластов на основе полипропилена, полиэтилена, полистирола и др., а также реактопластов на основе эпоксидных смол.

Статистические закономерности механических явлений в материалах в процессе производства изделий и внешних воздействий в условиях эксплуатации.

Для экспериментального исследования деформационно-прочностных и усадочных характеристик конструкционных термопластов использованы современные приборы и оборудование Томского университета систем управления и радиоэлектроники, Научно-исследовательского центра Томского нефтехимического комбината.

Для оценки надежности изделий и конструкций использованы средства и методы вычислительной механики.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- разработан метод прогнозирования надежности изделий и конструкций из полимерных композиционных материалов с использованием новых и усовершенствованных вероятностно-статистических моделей, заключающийся в сочетании статистически достоверных экспериментальных данных о свойствах материалов, зависящих от условий и времени эксплуатации, и теоретических методов анализа НДС изделий;

- установлены новые статистические закономерности и количественное влияние внешних воздействий, изменчивости и стабильности деформационно-прочностных, усадочных характеристик, концентраторов напряжений, масштабного эффекта, содержания производственных и технологических отходов, технологических режимов переработки на надежность изделий по критериям конструкционной прочности и размерной точности на этапах проектирования, производства и эксплуатации;
- впервые предложен и реализован метод расчета статистических эффективных характеристик полимерного композиционного материала с учетом рассеяния свойств фаз на основе компьютерного проектирования с использованием модели структурно-неоднородной среды;
- предложен метод прогнозирования надежности изделий из полимерных материалов по критерию климатической стойкости на основе полученных экспериментальных данных о деформации и разрушении материалов в процессе старения;
- разработаны и реализованы методами вычислительной механики задачи анализа НДС элементов конструкций с учетом нелинейного поведения материала, позволяющие с учетом статистической изменчивости свойств материала определить параметры НДС и их рассеяние с целью определения надежности;
- разработан метод наглядного представления распределения вероятности безотказной работы конструкции на основе статистически достоверных экспериментальных данных о предельных прочностных характеристиках материала и о параметрах НДС.

#### **На защиту выносятся**

- метод прогнозирования надежности изделий из полимерных композиционных материалов;
- методы, устройства и результаты исследований усадочных, дилатометрических и упругих характеристик полимерных материалов;
- совокупность экспериментально полученных статистических закономерностей и связей, определяющих количественное влияние рассеяния характеристик, концентраторов напряжений, масштабного эффекта, технологических режимов переработки, внешних воздействий на напряженное состояние и надежность изделий из термопластичных материалов на основе ПП, полистирола и других термопластов на этапах проектирования, производства и эксплуатации;
- совокупность экспериментально полученных статистических закономерностей о деформационно-прочностных, усадочных характеристиках полимерных материалов на основе ПП с различным содержанием производственных и технологических отходов и обоснование технологии

изготовления изделий из этих материалов с вовлечением в производство вторичного сырья;

- новый метод расчета статистических эффективных характеристик полимерного композиционного материала с учетом рассеяния свойств фаз на основе компьютерного проектирования с использованием модели структурно-неоднородной среды как основы для определения надежности изделий из этих материалов;

- метод оценки вероятности безотказной работы конструкции с учетом нелинейного поведения материала на основе статистически достоверного массива данных о параметрах НДС изделий;

- метод прогнозирования ресурса (срока службы) для типовых расчетных схем изделий из полимерных материалов с учетом статистической изменчивости их свойств под воздействием условий эксплуатации.

**Практическая ценность работы** состоит в разработке метода прогнозирования надежности изделий; в решении проблемы использования производственных и технологических отходов полимерных материалов в производстве изделий. В рамках решения этих проблем:

- разработаны и доведены до практического применения методы прогнозирования надежности изделий с учетом основных критериев их работоспособности: конструкционной прочности и размерной точности, в том числе для изделий из композиций термопластов с использованием вторичного сырья;

- разработаны методы и устройства экспериментальных исследований эксплуатационных характеристик полимерных материалов, защищенные авторскими свидетельствами на изобретения;

- создана база данных по полимерным композиционным материалам, применяемым в машино- и приборостроении и на ее основе информационно-поисковая система выбора материалов с оценкой вероятности безотказной работы для типовых расчетных схем изделий;

- проведены расчеты стойкости исследуемых полимерных композиционных материалов в условиях умеренного и холодного климата.

- рассчитан ресурс (срок службы) для типовых расчетных схем изделий из ПКМ в условиях умеренного климата.

**Личный вклад автора** в проведенные исследования заключается в формулировании проблем и определении методологии исследования, получении и обобщении теоретических и экспериментальных результатов и внедрении результатов работы в промышленность.

**Достоверность основных положений, выводов и рекомендаций**

основывается на использовании стандартных методов и авторских устройств для испытаний полимерных материалов, большим объемом статистической информации, применением современных методов вычислительной механики и

программного обеспечения, проведением тестовых расчетов, совпадением расчетных данных с экспериментами на натуральных изделиях и результатами опытно-промышленных испытаний.

**Реализация результатов исследований** осуществлена в ЗАО «Союзполимерстрой» г. Томск, ООО «Томскнефтехим», АО «Пластполимер» г. Томск, СКБ ПО «Сибэлектромотор», Югорском институте развития строительного комплекса, г. Ханты-Мансийск.

На ОАО «СКБ Сибэлектромотор» проведены исследования влияния старения на усадочные характеристики и физико-механические свойства термопластов для изготовления деталей двигателей 4АМ и АИ различных климатических исполнений. По результатам работы проведена замена материала деталей электродвигателей из черных металлов и цветных сплавов: вентилятор, кожух вентилятора, коробка выводов, крышка коробки выводов и др. на материалы на основе полипропилена. Фактический экономический эффект составил 479 тыс. руб. (в ценах 1990 г.). На предприятии внедрена методика прогнозирования климатической стойкости конструкционных термопластов по деформационному критерию.

На ЗАО «Пластполимер» (г. Томск) проведены исследования физико-механических характеристик композиционных материалов на основе полипропилена для обоснования функционирования системы сбора и реализации отходов производства полипропилена на Томском нефтехимическом комбинате, использующиеся для вторичной переработки методами литья под давлением и экструзией в технические изделия и изделия народного потребления.

Внедрение результатов исследования на ЗАО «Союзполимерстрой» позволило вовлечь производственные отходы ПП в производство перемычек и втулок для крепления навесных конструкций. Экономический эффект составляет 2 269 260 (два миллиона двести шестьдесят девять тысяч двести шестьдесят) рублей в год. Результаты работы позволяют проводить выбор марок полимерных материалов изделий, которые проектируются, изготавливаются и применяются на ЗАО «Союзполимерстрой», прогнозировать их эксплуатационную надежность в зонах умеренного и холодного климата.

Для ООО «Томскнефтехим» разработаны, изготовлены и поставлены втулки из полимерного композиционного материала в качестве заготовок для уплотнительных элементов клапана.

Проведенные в условиях производства испытания в период с марта 2005г. по февраль 2006г. показали необходимую герметичность клапана в эксплуатационном режиме нагружения и уплотнительные кольца рекомендованы к дальнейшему использованию в сальниках арматуры высокого давления вместо импортных аналогов.

Методика М-3-09 «Прогнозирования надежности строительных изделий и конструкций из полимерных материалов» внедрена в Югорском институте развития строительного комплекса.

Приведенные в диссертации данные включены в лекционные курсы «Прикладная механика», «Материаловедение», «Оценка надежности изделий» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на 8 международных, 6 всесоюзных, 4 республиканских, 5 региональных и 10 вузовских конференциях, в том числе: Всесоюзном семинаре «Методы исследования и прогнозирования климатической устойчивости полимерных и композитных материалов и изделий из них» (Якутск, 1985); VI Всесоюзной конференции по механике полимеров и композитных материалов (Рига, 1986); научно-технической конференции "Прогрессивные полимерные материалы, технология их переработки и применение» (Ростов-на-Дону, 1988); научно-технической конференции "Полимерные материалы в машиностроении" (Ижевск, 1989); VIII конференции по старению и стабилизации полимеров, (Душанбе, 1989); Seminar of Laboratori of Mechanical Reliability, Delft University of Tehnology (The Netherlands, 1990); Всесоюзной конференции "Переработка полимерных материалов в изделия" (Ижевск, 1993); ежегодных отраслевых совещаниях "Проблемы и перспективы развития ПО Томский нефтехимический комбинат" (Томск, 1987-1995); научно-технической конференции по использованию результатов конверсии науки в вузах Сибири для международного сотрудничества Сибконверс'95 (Томск, 1995); IV Международной научной конференции "CADAMT'95. Компьютерное конструирование перспективных материалов и технологий" (Томск, 1995); 3 Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», «Сибресурс-3-97», (Красноярск, 1997); The 4 Korea-Russia International Symposium of Science and Technology, KORUS 2000 (Ulsan, Republic of Korea, 2000); 6 Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», Сибресурс-6-2000 (Тюмень, 2000); The 5 Korea-Russia International Symposium of Science and Technology, KORUS 2001 (Tomsk, Russia, 2001); The 7 Korea-Russia International Symposium of Science and Technology, KORUS 2000 (Ulsan, Republic of Korea, 2003); Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (Томск, 2004); Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2004); IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике, (Н. Новгород, 2006); Международной школе-семинаре «Многоуровневые подходы

в физической мезомеханике. «Фундаментальные основы и инженерные приложения», (Томск, 2008); VI Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», (Томск, 2008).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы изложено в монографии, 65 научных статьях и докладах, в том числе 14 статей в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторских диссертаций. По теме диссертации получено 5 авторских свидетельств.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, семи разделов, общих выводов, списка литературы и приложения. Результаты исследований представлены на 327 страницах основного текста, включающего 137 рисунков, 26 таблиц, библиографию из 309 наименований. Объем приложения составляет 38 страницы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель работы и ее задачи, перечислены полученные новые результаты, раскрыты их практическая и научная ценность, представлены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

**Первый раздел** диссертационной работы посвящен рассмотрению проблем применения полимерных материалов, расчету прочностной надежности изделий и конструкций, прогнозированию эксплуатационных свойств полимерных композиционных материалов при старении.

Обзор современного состояния применения полимерных материалов показал возрастающее применение изделий из ПКМ во всех отраслях промышленности. Полимерные материалы в изделиях применяются как для замены традиционных материалов, так и в принципиально новых технологиях. Из них изготавливают конструкционные детали электротехнического назначения, детали автомобиля, детали антифрикционного назначения: зубчатые колеса, кулачки, муфты, подшипники, корпусные детали и др. Герметизирующие полимерные материалы применяются для герметизации микросборок приборов и аппаратуры, заделки швов между панелями и блоками сборных конструкций, стыков трубопроводов. Широкое применение в машино- и приборостроении, в инженерном обеспечении объектов строительства получили трубы из полимерных материалов.

Из полимерных материалов на основе полипропилена изготавливают комплектующие детали автомобилей: бамперы, панели приборов, корпуса аккумуляторов; корпусные детали бытовой и оргтехники, трубы, фитинги, контейнеры, футляры, емкости, пленку различного назначения, полимерные противоналипающие футеровочные пластины и др.

Из многообразия изделий и конструкций из ПП можно выделить группу, которая подвергается воздействию естественных климатических факторов:

наружные детали автомобиля, поверхностные технологические трубопроводы, элементы систем поверхностного водоотвода (дождеприемники, желоба, лотки, решетки), конструкции дорожной инфраструктуры (разделительные дорожные барьеры и блоки, дорожные указатели, дорожные сигнальные конусы, вехи, столбики) и др.

Надежность изделия, являющаяся одной из важнейших характеристик, должна обеспечиваться на всех стадиях жизненного цикла изделия, начиная с выбора конструктивного решения, производства и эксплуатации.

Комплексный подход к расчету прочностной надежности машин, конструкций и сооружений предложен В.В. Болотиним. Методы оценки надежности и долговечности конструкций изложены в работах В.Н. Аликина, В.Ф. Гладкого, К.Н. Кана, В.П. Когаева, Г.Л. Колмогорова, М.А. Колтунова, А.А. Ильюшина, А.И. Потапова, А.С. Проникова, В.П. Радченко, В.Д. Райзера, Д.Н. Решетова, А.Р. Ржаницина, С.В. Серенсена, Ю.П. Самарина, А.Ф. Селихова, М.Н. Степнова, Ю.Л. Тарасова, С.А. Тимашева, В.М. Труханова, В.П. Чиркова и др., а также зарубежных авторов Р. Барлоу, В. Вейбулла, К. Капура, Л. Ламберсона, Г. Шпете, и др.

Важными способами повышения надежности изделий является выбор полимерного материала и учет влияния конструктивных факторов при проектировании, получение стабильных механических, теплофизических и других свойств материала, учет влияния технологических режимов и соотношения содержания исходного и вторичного материала при его переработке в изделие, повышение сопротивляемости изделия воздействию окружающей среды. Кроме того, методы нахождения рациональных конструктивных решений при выборе размеров изделий основаны на исследовании технологической и эксплуатационной усадки полимерных композиционных материалов.

Для оценки надежности необходимо знать не только эксплуатационные свойства материалов, но и изменение их статистических характеристик в период эксплуатации в конкретных условиях.

Проблема надежности в количественной постановке при проектировании, производстве и эксплуатации изделия сложна. Для решения вопроса оценки надежности необходимо учесть достижения современной теории надежности, особенности работы нагруженных и сопрягаемых изделий, подверженных в значительной степени влиянию неблагоприятных воздействий внешней среды в процессе хранения и эксплуатации.

**Второй раздел** диссертационной работы посвящен рассмотрению исходных материалов и методов исследования.

Исследованные композиционные материалы представляют собой конструкционные термопласты на основе полипропилена, полиэтилена, полистирола и др. пластмасс, а также реактопласты на основе эпоксидных смол. Основное внимание уделено конструкционным термопластам на основе

композиций полипропилена как наиболее широко применяемым полимерным материалам во всех отраслях промышленности.

Полимерные материалы на основе полипропилена представлены базовыми марками полипропилена, а также наполненными и морозостойкими композициями полипропилена, блоксополимерами пропилен с этиленом. Проанализированы материалы, представляющие собой смеси базовых, наполненных и морозостойких марок полипропилена, выпускаемых Томским нефтехимическим комбинатом, с производственными отходами.

На основе анализа форм и размеров образцов различных национальных и международных стандартов и с целью проведения исследования влияния масштабного фактора на деформационно-прочностные характеристики определены четыре типоразмера образцов с поперечным сечением 2.5x1; 5x2; 13x3 и 25x8 мм<sup>2</sup>. Размеры образца сечением рабочей части 5x2 мм<sup>2</sup> соответствуют ГОСТ 11262-80 – тип 5, образца сечением рабочей части 13x3 мм<sup>2</sup> - ASTM D 638 – тип I. Размеры образцов сечением рабочей части 2,5x1 и 25x8 мм<sup>2</sup> расширяют диапазон исследования масштабного фактора. Для их изготовления были разработаны четыре многогнездные пресс-формы с каналами для охлаждающей жидкости.

Для определения деформационно-прочностных, упругих, усадочных и теплофизических характеристик объектов исследования использованы стандартные методы испытаний, а также оригинальные устройства и методики, защищенные авторскими свидетельствами на изобретения.

Общее количество испытанных образцов для оценки надежности на этапах проектирования, производства и эксплуатации составило более 15000.

С целью автоматизации поиска полимерных материалов по заданным характеристикам была разработана база данных (БД) по полимерным материалам. Основу базы данных составили статистики экспериментальных данных по деформационно-прочностным, усадочным, теплофизическим характеристикам полимерных материалов, исследованных в данной работе, а также характеристики ряда материалов, взятые из справочной литературы. Для хранения данных был выбран формат таблиц БД Paradox. БД на основе таблиц Paradox показывает большую производительность и требует минимальных усилий по администрированию.

Дальнейшее развитие БД по полимерным материалам позволило разработать информационно-поисковую систему (ИПС), включающую подпрограмму выбора расчетной схемы и задания параметров для расчета, подпрограмму анализа выбранной схемы для определения вероятности безотказной работы. Типовые расчетные схемы реализуют одноосное напряженное состояние (крепежные детали, стержневые перемиčky и др.), двухосное напряженное состояние (тонкослойные полимерные покрытия, полимерные противоналипающие пластины и др.), трехосное напряженное

состояние (толстослойные полимерные покрытия, трубы в сложном напряженном состоянии и др.)

**В третьем разделе** диссертационной работы разработан метод прогнозирования надежности изделий из полимерных композиционных материалов на этапах проектирования, производства, эксплуатации и вероятностно-статистические модели надежности по различным критериям.

Метод прогнозирования надежности изделий из полимерных композиционных материалов включает в себя

- выбор критерия работоспособности на основе анализа изделия, его назначения, режима работы, условий эксплуатации, вида ожидаемых отказов.
- установление комплекса характеристик, выбранного на основе критерия работоспособности изделия. Эти характеристики являются составляющими статистической модели надежности. Выбор предельной характеристики, по отношению которой осуществляется расчет надежности.
- выбор стандартных методов испытаний материалов и разработку новых методов и устройств определения механических и усадочных характеристик, учитывающих особенности полимерных композиционных материалов.
- разработку вероятностно-статистических моделей оценки надежности изделий из полимерных композиционных материалов на этапах проектирования, производства и эксплуатации.
- исследование статистической изменчивости деформационно-прочностных и усадочных характеристик полимерных композиционных материалов на этапах жизненного цикла изделия.
- установление взаимосвязей между надежностью и характеристиками, входящим в модель надежности на этапах проектирования, производства и эксплуатации.
- прогнозирование надежности с учетом определяющих факторов при проектировании, производстве и эксплуатации изделия.
- построения распределения вероятности безотказной работы по конструкции.

Разработаны и усовершенствованы вероятностно-статистические модели надежности по критериям прочности и точности изделий из полимерных материалов для случаев катастрофического и параметрического отказов.

Для оценки надежности изделий из полимерных материалов, работающих в условиях кратковременного нагружения, предложена модель расчета надежности с учетом старения материала и температурной зависимости предельных и расчетных напряжений. Структурная схема поэтапного расчета надежности по критерию прочности приведена на рис. 1.

Вероятность безотказной работы  $R$  при нормальном распределении прочности и напряжения в эксплуатационном диапазоне температур  $T$  с учетом времени старения материала  $t$ , выраженная через нормированную функцию нормального распределения, имеет вид

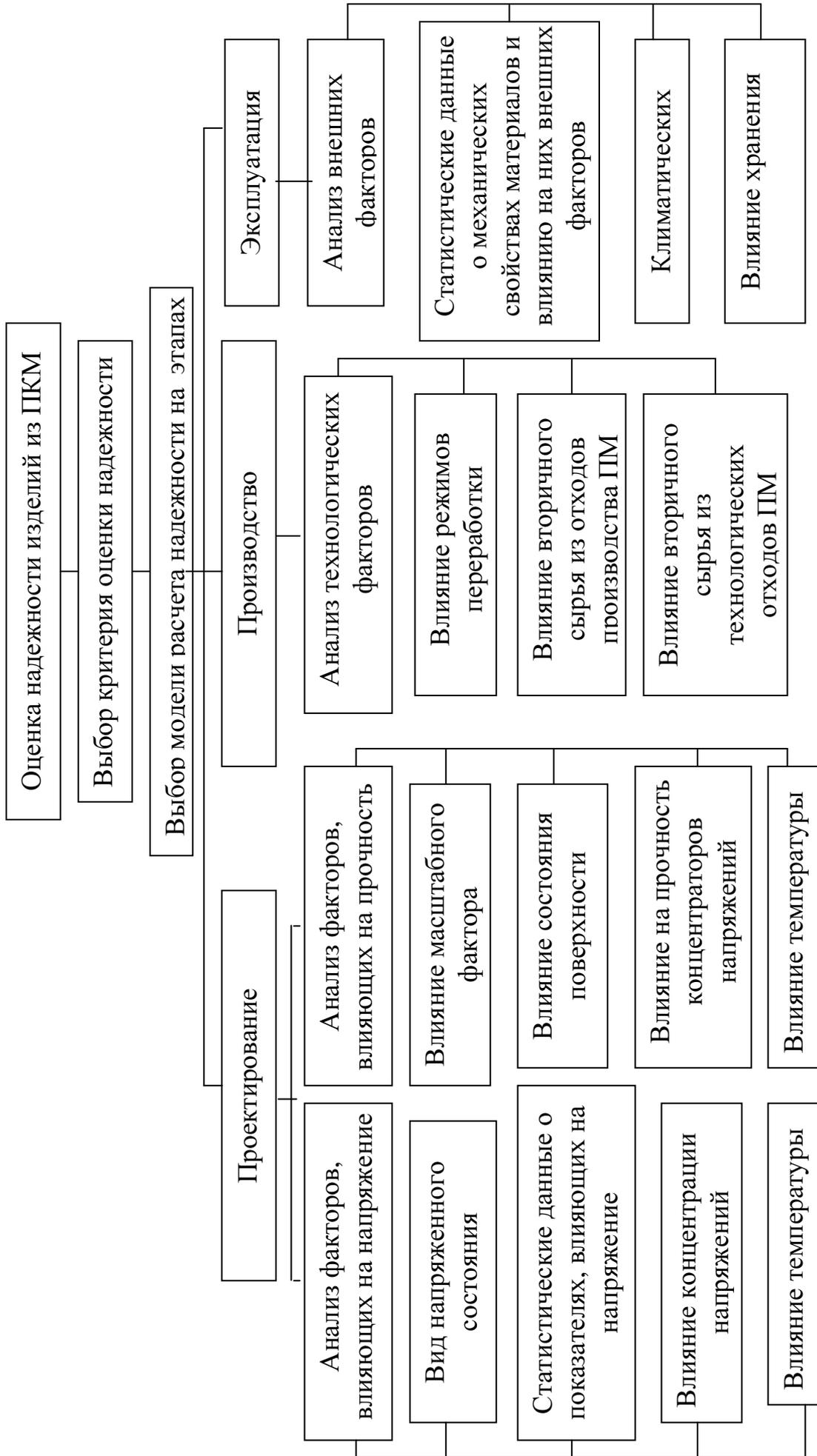


Рис. 1. Структурная схема оценки надежности по критерию прочности

$$R = 1 - \Phi \left[ -\frac{m_{\sigma_{np}}(T, t) - m_{\sigma_{экв}}(T, t)}{\sqrt{S_{\sigma_{np}}^2 + S_{\sigma_{экв}}^2}} \right], \quad (1)$$

где  $m_{\sigma_{np}}(T, t)$ ,  $S_{\sigma_{np}}$  – математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение предельных напряжений (предела текучести, прочности при растяжении);  $m_{\sigma_{экв}}(T, t)$ ,  $S_{\sigma_{экв}}$  – математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение эквивалентного напряжения;  $\Phi(z)$ - функция Лапласа;

При параметрическом отказе условие работоспособности будет включать ограничение перемещения какой-либо опасной точки и может быть представлено в виде

$$\delta_{max}(\tau) \leq |\delta|,$$

где  $\delta_{max}$  - перемещение опасной точки детали;

$|\delta|$  - допускаемое условиями эксплуатации перемещение;

$\tau$  - срок службы детали.

Вероятность безотказной работы  $R$  в течение срока службы  $\tau$  определится

$$R = P(t < \tau, \delta < |\delta|) = \int_{-\infty}^{|\delta|} \frac{1}{s_{\delta}(\tau) \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\delta - m_{\delta}(\tau)}{s_{\delta}(\tau)} \right)^2 \right] d\delta = \Phi(z), \quad (2)$$

где  $\Phi(z)$ - функция Лапласа;

$z = \frac{|\delta| - m_{\delta}(\tau)}{s_{\delta}(\tau)}$  – нормированный аргумент функции Лапласа.

$m_{\delta}(\tau)$ ,  $s_{\delta}(\tau)$  – математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение перемещения в момент времени  $\tau$ .

Модель расчета надежности по критерию климатической стойкости, основана на анализе распределений текущего  $\varepsilon_p(t)$  и предельного  $\varepsilon_T$  значений деформационных параметров. До пересечения математических ожиданий относительной деформации при разрыве  $m_{\varepsilon_p(t)}$  и относительной деформации при пределе текучести  $m_{\varepsilon_T}$ , возникает перекрытие их распределений.

Обозначим случайную величину  $y = \varepsilon_p(t) - \varepsilon_T$ , тогда вероятность безотказной работы  $R(t)$  можно представить в виде  $R(t) = P(y > 0)$ .

$$R(t) = P(y > 0) = \int_0^{\infty} \frac{1}{s_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y - m_y}{s_y} \right)^2 \right] dy \quad (3)$$

Выражая вероятность безотказной работы  $R(t)$  через нормированную функцию нормального распределения, получаем

$$R = 1 - \Phi \left[ -\frac{m_{\varepsilon_p(t)} - m_{\varepsilon_T}}{\sqrt{S_{\varepsilon_p(t)}^2 + S_{\varepsilon_T}^2}} \right] \quad (4)$$

где  $S\varepsilon_{p(t)}$ ,  $S\varepsilon_T$  - средние квадратические отклонения текущего значения относительной деформации при разрыве и относительной деформации при пределе текучести.

Модель расчета надежности по критерию размерной точности основана на анализе распределений усадочных характеристик и размерного допуска изделия. При изменении размера изделия из ПКМ в процессе эксплуатации при старении или при хранении вероятность безотказной работы, т.е. вероятность нахождения размера изделия в поле допуска, можно определить через нормированную функцию нормального распределения.

Влияние различных факторов на надежность изделий из полимерных композиционных материалов на этапе проектирования рассмотрено **в четвертом разделе** диссертационной работы.

Проведен анализ факторов, влияющих на действующие напряжения в конструкции и на прочностные характеристики материала, при расчете вероятности безотказной работы по критерию прочности, и анализ факторов, влияющих на усадочные характеристики, при расчете вероятности безотказной работы по критерию точности.

На значения напряжений влияет рассеяние упругих, деформационных, и теплофизических характеристик. В табл. 1 представлены значения средних (числитель) и средних квадратических отклонений (знаменатель) модуля упругости  $E$ , коэффициента Пуассона  $\mu$ , коэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР) в стеклообразном  $\alpha_{ст}$  и в высокоэластическом  $\alpha_{в.э}$  состояниях и температуры стеклования  $T_{ст}$  материалов на основе полипропилена.

Таблица 1

Статистические характеристики композиций полипропилена

Материал	$E$ , МПа	$\mu$	$\alpha_{ст}, 10^6/град$	$\alpha_{в.э}, 10^6/град$	$T_{ст}, ^\circ K$
БСПЭ 22007-16	1170 / 95	0,37 / 0,020	-	98 / 12	-
МПП 15-04	1110 / 77	0,36 / 0,018	-	104 / 14	-
МПП 15-04-901	1100 / 76	0,36 / 0,017	-	101 / 13	-
СНПП 21060-16-С30	1500 / 114	0,26 / 0,016	15 / 2,7	30 / 3,2	272 / 2

Экспериментально установлено, что деформационно-прочностные, упругие и усадочные характеристики подчиняются закону нормального распределения.

Исследовались материалы на основе полипропилена. Образцы четырех типоразмеров в форме лопаток имели площадь поперечного сечения 2,5; 10; 39 и 200 мм<sup>2</sup>. Образцы изготавливались методом литья под давлением на

термопластавтомате “Kuasy 260/100”, в количестве 30 шт. для каждого типоразмера.

Образцы испытывали на растяжение на испытательной машине 2167 Р-50 при скорости растяжения 50 мм/мин и температуре  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ . По результатам испытания определяли предел текучести при растяжении  $\sigma_T$ , прочность при разрыве  $\sigma_{pp}$  по ГОСТ 11262-80, а также относительную деформацию при разрыве  $\epsilon_p$  и деформацию шейкообразования  $\epsilon_{ш}$  образцов.

Зависимость среднего значения предела текучести и среднего квадратического отклонения от площади поперечного сечения образца для термопластов на основе полипропилена представлена на рис. 2.

Видно, что с ростом площади поперечного сечения образцов происходит уменьшение среднего значения и среднего квадратического отклонения предела текучести исследуемых частично кристаллических термопластов. Это связано с их слоистой структурой, формирующейся в процессе переработки материала.

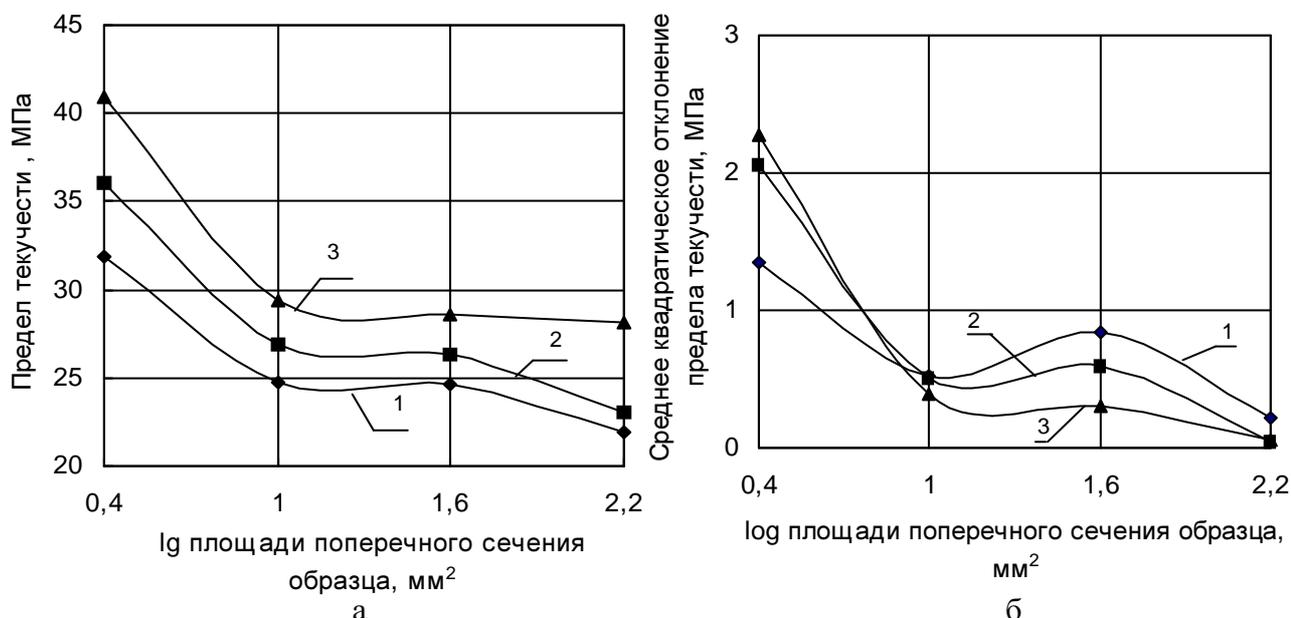


Рис. 2. Зависимость среднего значения предела текучести а и среднего квадратического отклонения б от площади поперечного сечения образца для термопластов на основе полипропилена: 1- МПП 15-04, бесцветный; 2 - МПП 15-04, черный; 3 – БСПЭ 22007-16

Зависимость предела текучести  $\sigma_T$  от логарифма площади поперечного сечения образца  $A_0$ , можно представить степенной функцией

$$\sigma_T = C \lg A_0^b, \quad (5)$$

Коэффициенты аппроксимирующей функции, зависящие от вида термопласта, приведены в табл. 2.

Влияние концентрации напряжений на прочность полимерных материалов учитывается эффективным коэффициентом концентрации  $K_\sigma$

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{pm}}{\sigma_{pmk}},$$

где  $\sigma_{pm}$  – прочность при растяжении образца без концентратора.

$\sigma_{pmk}$  - прочность при растяжении образца с концентратором.

При исследовании влияния концентратора напряжений на прочность полимерного материала при растяжении в образце высверливалось отверстие. Отношение диаметра отверстия к ширине образца принималось равным 0.2.

Экспериментальные данные по эффективному коэффициенту концентрации напряжений частично-кристаллических и аморфных полимерных материалов приведены в табл. 3.

Таблица 2

## Коэффициенты аппроксимирующей функции

Материал	$C$	$b$
МПП 15-04, бесцв.	31,21	- 0,251
МПП 15-04, черный	35,32	- 0,306
БСПЭ 22007-16	39,03	- 0,275
ПП 21060-16	38,34	- 0,251
ПП 21060-15-A20	36,74	- 0,253

Установлено, что с увеличением площади поперечного сечения образцов возрастает чувствительность материала к концентрации напряжений.

Таблица 3

## Эффективный коэффициент концентрации напряжений термопластов

Материал	$\sigma_{pm}$	$S\sigma_{pm}$	$\sigma_{pmk}$	$S\sigma_{pmk}$	$K_{\sigma}$
ПП 21060-16 T20	33,7	0,35	36,9	0,44	0,91
ПП 21060-16 A20	32,0	0,37	34,6	0,33	0,93
МПП 15-04, бесцв.	24,7	0,53	29,9	0,61	0,83
МПП 15-04, черный	26,9	0,51	34,3	0,71	0,78
БСПЭ 22007-16	29,4	0,39	37,4	0,53	0,79
МБС 07-12	20,5	0,97	19,9	0,46	1,03
УПС 825, черный	27,3	0,58	25,9	0,76	1,05
АБС 2020	40,7	0,65	36,2	0,9	1,12
ПА 610-1-108	134,0	8,62	100,1	3,46	1,34
Поликарбонат ПК-2	62,2	1,19	52,0	2,46	1,20

Примечание:  $\sigma_{pm}$ ,  $S\sigma_{pm}$  – среднее значение, среднее квадратическое отклонение прочности при растяжении образцов без концентратора напряжений, МПа;

$\sigma_{pmk}$ ,  $S\sigma_{pmk}$  – среднее значение, среднее квадратическое отклонение прочности при растяжении образцов с концентратором напряжений;

$K_{\sigma}$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений.

Модель расчета надежности по критерию точности на этапе проектирования зависит от усадочных характеристик при переработке

термопластов, структурной составляющей усадки для эпоксиполимеров, а также температурной или термической усадки. Рассеяние усадочных характеристик при переработке термопластов определяет величину размерного допуска, характерного для данного материала.

На рис. 3а показано влияние средних квадратических отклонений параметров, составляющих модели надежности - предела текучести, коэффициента Пуассона, модуля упругости - на вероятность безотказной работы. Вероятность безотказной работы рассчитана для случая нанесения полимерного покрытия на жесткую основу.

Двухосное напряженное состояние возникает из-за разницы КЛТР жесткой основы и полимерного покрытия. Коэффициент безопасности  $n$  который определяется как отношение среднего значения предела текучести  $\sigma_T$  к среднему значению эквивалентного напряжения  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , принимаем  $n=1.2$ .

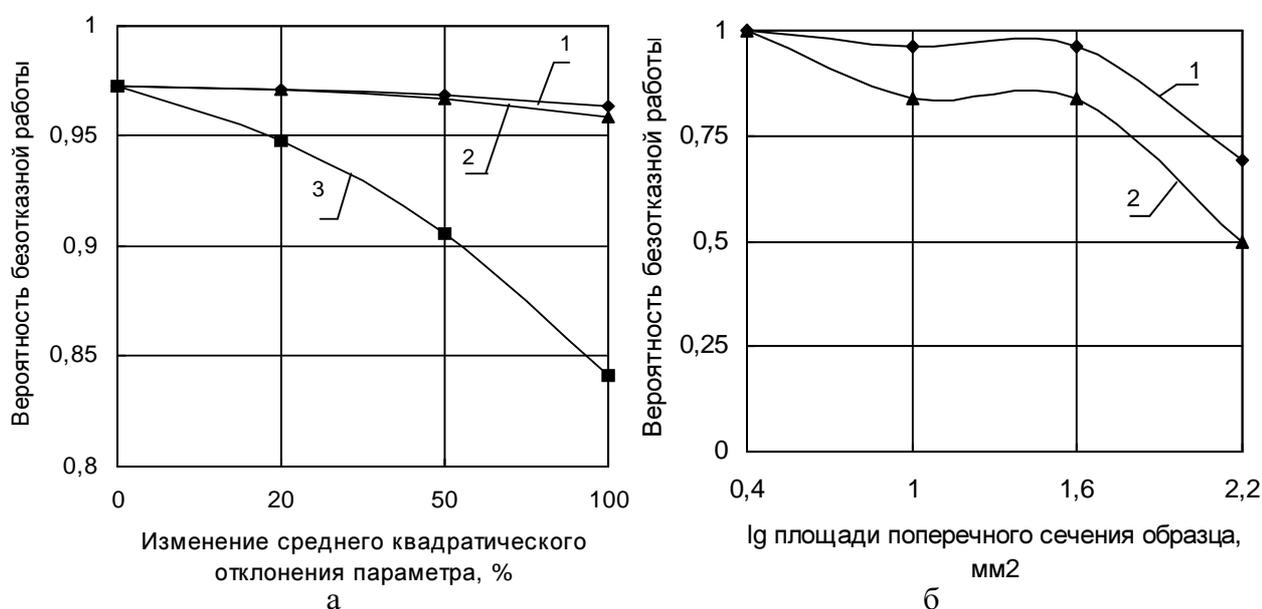


Рис. 3. Зависимость вероятности безотказной работы от изменения среднего квадратического отклонения параметра - а, 1 – предел текучести; 2 – коэффициент Пуассона; 3 – модуль упругости – а и от  $\lg A_0$ ,  $\text{мм}^2$  для термопластов на основе полипропилена: 1 - МПП 15-04, бесцветный; 2 - БСПЭ 22007-16 – б

Эквивалентные напряжения рассчитываются по гипотезе наибольших касательных напряжений. Исходное (нулевое) значение средних квадратических отклонений модуля упругости, коэффициента Пуассона и предела текучести соответствуют экспериментально определенным для материала МПП 15-04-901. Возрастание среднего квадратического отклонения параметров рассчитано через 20, 50 и 100% от исходного значения соответствующего параметра. Из графика видно, что наибольшее влияние на вероятность безотказной работы оказывает модуль упругости. При росте среднего квадратического отклонения модуля упругости в два раза от исходного значения вероятность безотказной работы уменьшается с 0.973 до 0.841. Увеличение средних квадратических

отклонений коэффициента Пуассона и предела текучести незначительно влияет на надежность покрытия.

На основе статистической модели надежности рассчитана вероятность безотказной работы для изделий, различных поперечных сечений работающих в условиях одноосного напряженного состояния, рис. 3б.

Коэффициент безопасности для площади поперечного сечения  $2,5 \text{ мм}^2$  был принят 1.5 для обоих материалов. С увеличением площади поперечного сечения происходит уменьшение вероятности безотказной работы. Для БСПЭ 22007-16 при увеличении площади поперечного сечения образцов с  $2.5$  до  $200 \text{ мм}^2$  коэффициент безопасности изменяется с 1.5 до 1.1, а вероятность безотказной работы уменьшается от 0.999 до 0.5.

Одним из основных способов обеспечения надежности на этапе проектирования является выбор материала с требуемыми эксплуатационными свойствами. Эта задача может быть решена с применением методов вычислительной механики.

При решении прямой задачи компьютерного проектирования по заданным распределениям элементов структуры материала, их свойствам и характеру взаимодействия прогнозируются статистические эффективные характеристики материала. В качестве управляющих параметров принимаются, в частности, такие показатели, как степень наполнения композиции и средний размер включений. Определяется НДС расчетной области при внешнем силовом воздействии. В расчетной области возникают поля смещений, напряжений и деформаций.

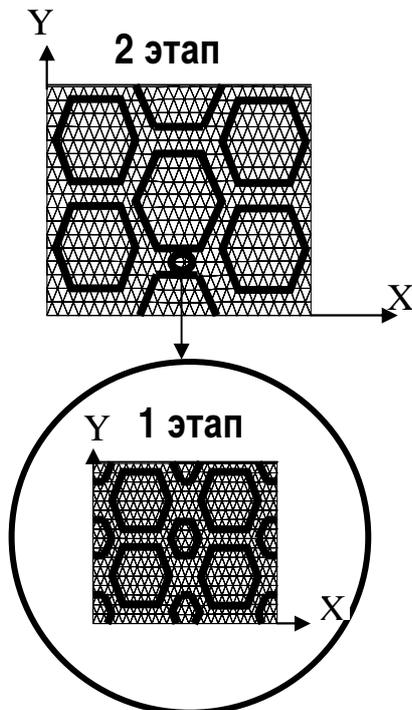


Рис. 4. Этапы расчета НДС полимерной композиции

Устанавливается связь между средними по расчетной области значениями напряжений и деформаций для каждого уровня прилагаемой нагрузки, а затем по этим данным строится кривая «напряжение-деформация» наполненного полимера. Эта кривая определяет эффективные характеристики материала. На основе расчетов были определены модули упругости наполненных полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных смол и наполнителя - пылевидного кварцевого песка (ПКП) и стеклонаполненного ПП. При высокой степени наполнения композиции и больших отличиях в размерах включений стандартные процедуры численного анализа НДС на регулярных сетках становятся неприменимыми. Большая степень наполнения композиции достигается за счет того, что пустоты, возникающие между включениями большего размера, заполняются более мелкой

фракцией наполнителя.

Расчет НДС в этом случае проводится в два этапа. На первом этапе анализа получаются эффективные свойства матрицы, модифицированной мелкими включениями, на втором – эффективные характеристики материала в целом, рис. 4.

Исходными данными для расчета являются модули упругости и коэффициенты Пуассона полимерной матрицы и наполнителя. Для ПКП коэффициент Пуассона  $\mu = 0,25$  и модуль упругости при растяжении  $E = 72$  ГПа, плотность  $2650$  кг/м<sup>3</sup>.

Для рассматриваемого представительного объема материала получены поверхности и изолинии эквивалентных напряжений, рис.5.

Для расчета статистических характеристик модуля упругости наполненной композиции в качестве исходных данных использовался массив 30 значений модуля упругости матрицы, полученный экспериментальным путем.

Моделирование одноосного растяжения представительного объема стеклонаполненной композиции ПП21060-16-С30, ТУ 6-05-1912-81, представляющей собой механическую смесь полипропилена 21060-16 и 30 % рубленного стекловолокна марки РБН 2520-78, позволило построить диаграмму  $\sigma \sim \varepsilon$  в случае неупругого деформирования материала. В качестве метода расчета применяется МКЭ в сочетании с процедурой последовательных нагружений.

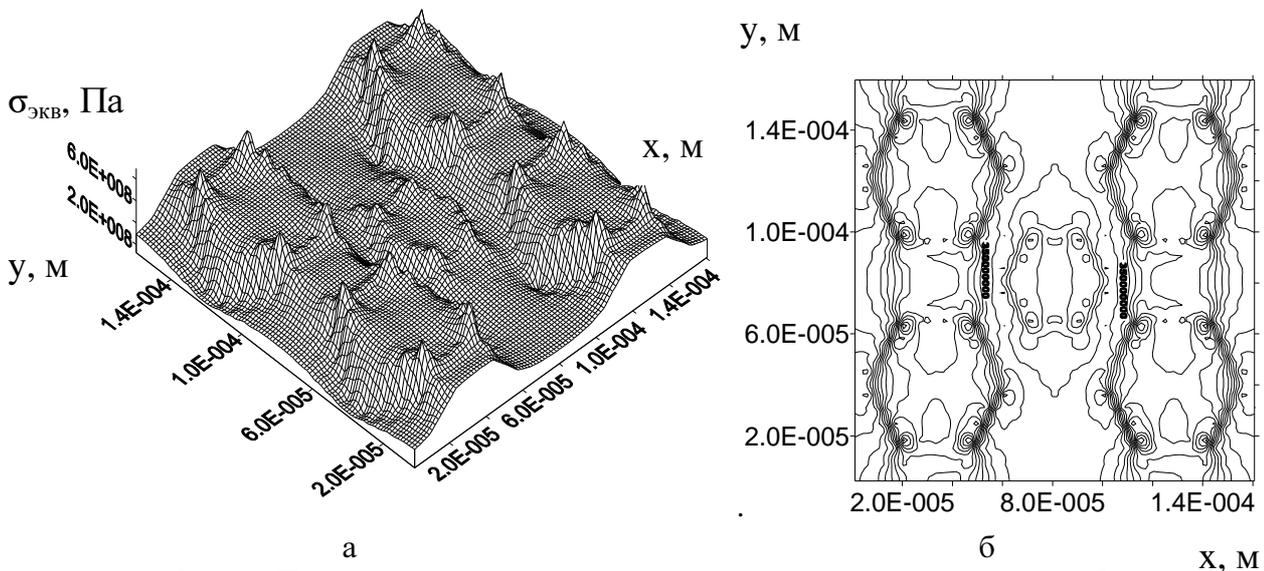


Рис. 5. Поверхности – а и изолинии эквивалентных напряжений – б

Исходными данными для расчета являются модули упругости и коэффициенты Пуассона ПП и наполнителя. Для рубленного стекловолокна коэффициент Пуассона  $\mu = 0.25$  и модуль упругости при растяжении  $E = 72$  ГПа. Результаты расчета эффективных характеристик наполненных композиций ПП и на основе эпоксидных смол приведены в табл. 4.

Таблица 4

## Эффективные характеристики полимерных композиций

Композиция	Модуль упругости (расчет) $E_{\kappa}$ , МПа	Модуль упругости (эксперимент) $E_{\kappa}$ , МПа	Коэффициент Пуассона (эксперимент) $\mu_{\kappa}$
ЭД20+ ГМДА (матрица)	-	4000/720	0.34/0.05
ЭД20+ ГМДА+200 м.ч.ПКП	9280/1510	8700/1650	0.33/0.07
ЭД16+Диамет X (матрица)	-	5300/1230	0.34/0.06
ЭД16+Диамет X+250 м.ч.ПКП	14800/2800	11800/3400	0.32/0.08
ПП 21060-16	-	1150/93	0.36/0.018
СНПП 21060-16-С30	1650/105	1500 / 114	0.26/0.016

Примечание: числитель – среднее значение модуля упругости, знаменатель - среднее квадратическое отклонение модуля упругости.

**В пятом разделе** диссертационной работы рассмотрено влияние технологических факторов на деформационно-прочностные и усадочные свойства материалов и на надежность полимерных изделий на этапе производства.

С целью изучения возможности вовлечения отходов производства Томского нефтехимического комбината для переработки в технические изделия проведено комплексное исследование их деформационно-прочностных и усадочных характеристик.

Для изучения деформационно-прочностных и усадочных свойств были приготовлены образцы из смеси некондиции базовой марки полипропилена, дробленки базовых марок, дробленки тальконаполненного полипропилена и дробленки самозатухающей композиции полипропилена.

Установлено, что деформационно-прочностные свойства образцов из смесей отходов полипропилена находятся в пределах требований к основным показателям на базовые и наполненные марки ПП.

На основе проведенных исследований разработаны технические условия «Отходы полипропилена» ТУ 6-05-405-88.

Технические условия распространяются на отходы полипропилена базовых марок, отходы морозостойкого и отходы самозатухающего полипропилена.

На этапе производства изделий из полимерных материалов к технологическим факторам, влияющим на прочностную надежность и размерную точность изделий из полимерных материалов, относятся технологические отходы, добавленные к исходному материалу при его переработке. Отходы переработки или технологические отходы образуются из литников и бракованных деталей.

Показано влияние режимов переработки на составляющие моделей расчета надежности по критериям прочности и точности.

В технологии переработки термопластов литьем под давлением можно выделить основные параметры, влияющие на механические свойства изделий: температура литья, давление литья, время впрыска, время выдержки под давлением. Механические свойства изделий из кристаллизующихся термопластов связаны со слоевой структурой, формирующейся при литье под давлением. Указанные слои отличаются по деформационно-прочностным и упругим свойствам.

Увеличение времени выдержки под давлением с 2 до 14 с приводит для термопласта ПП 21060-16 к росту среднего значения предела текучести с 33.1 до 34.2 МПа и снижению среднего квадратического отклонения предела текучести с 0.71 до 0.4 МПа при температуре литья 200°C.

Повышение температуры литья с 200 до 270 °С практически не влияет на среднее значение предела текучести, при этом среднее квадратическое отклонение предела текучести возрастает от 2 до 3 раз.

На рис. 6а приведена зависимость вероятности безотказной работы по критерию прочности от времени выдержки под давлением для различных температур литья. Вероятность безотказной работы по критерию прочности рассчитана для случая модельного одноосного напряженного состояния. Коэффициент безопасности  $n$  принимался равным 1.2 для термопласта ПП 21060-16 при переработке литьем под давлением с параметрами: давление  $P = 80$  МПа, температура  $T_{л} = 200$  и  $270^{\circ}\text{C}$ , время выдержки под давлением 14 с.

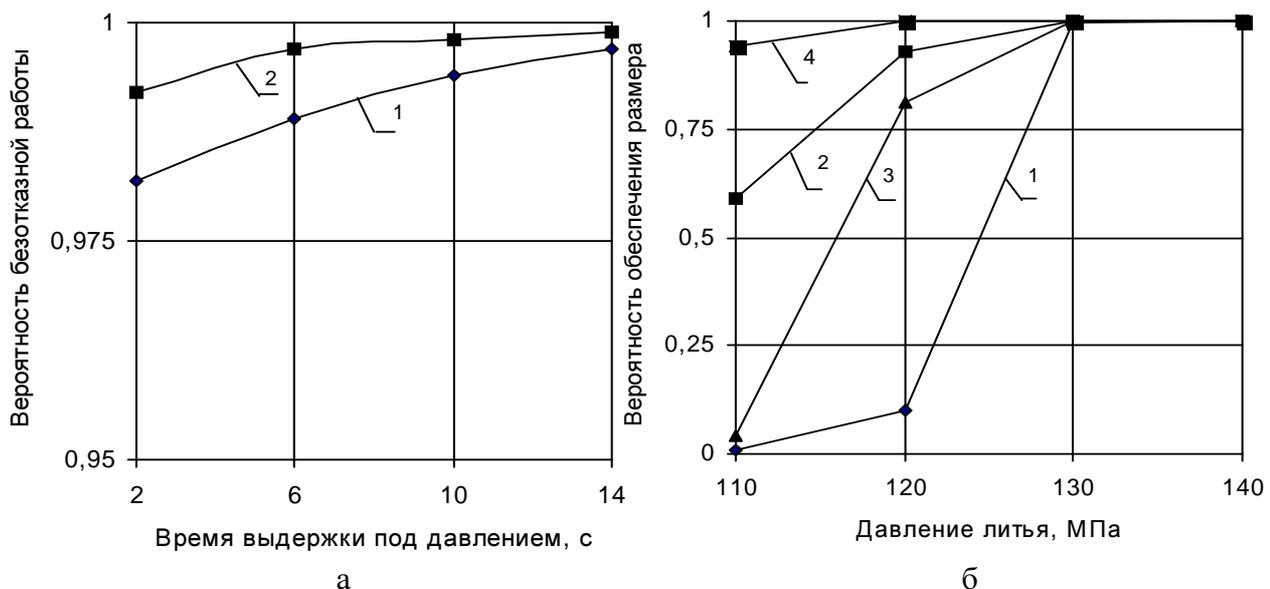


Рис. 6. Зависимость вероятности безотказной работы по критерию прочности – а и точности - б от времени выдержки под давлением ПП 21060-16, черный, при  $P = 80$  МПа, 1-  $T_{л} = 270^{\circ}\text{C}$ , 2 -  $T_{л} = 200^{\circ}\text{C}$  – а, от давления литья при температуре литья  $190^{\circ}\text{C}$  для термопласта УПС-825, черный: 1, 3 - размеры вдоль направления литья и 2, 4 поперек направления литья 1, 2 – 9 квалитет точности, 3, 4 – 10 квалитет точности – б

Видно, что уменьшение времени выдержки под давлением приводит к снижению вероятности безотказной работы.

На рис. 6б показана зависимость вероятности обеспечения размера от давления литья для термопласта УПС-825. Вероятность нахождения размера в поле допуска в исходном состоянии при давлении литья 140 МПа принималась равной единице. В исходном состоянии допуск, рассчитанный по колебанию усадки, соответствовал девятому качеству точности.

Проведено исследование усадочных и дилатометрических свойств полимерных компаундов при отверждении в зависимости от температурных режимов, степени наполнения для композиций диановых эпоксидных смол ЭД – 8, ЭД – 16, ЭД – 20 с отвердителями аминной группы: диаметом- х, метафенилендиамином, гексаметилендиамином.

Предложен метод определения усадочных характеристик в процессе отверждения: объемной усадки до гелеобразования, линейной усадки после гелеобразования и полной объемной усадки.

Для исследования изменения концентрации функциональных групп в процессе отверждения применялся метод ИК-спектроскопии. Процесс отверждения эпоксидной смолы первичными аминами исследовался по конверсии эпоксидных групп. Сравнение кривых усадки и конверсии эпоксидных групп дает основание использовать кривые усадки для оценки степени завершенности процесса отверждения, что значительно снижает трудоемкость и сложность эксперимента.

Влияние температуры отверждения на дилатометрические характеристики незначительно и проявляется в основном в смещении температуры стеклования. Из исследованных отвердителей аминного типа наибольшую усадку обнаруживает отвердитель метафенилендиамин (МФДА). Установлено, что введение наполнителя резко уменьшает скорость усадки, оставляя при этом время гелеобразования примерно на том же уровне.

**В шестом разделе** диссертационной работы исследовано влияние эксплуатационных факторов на свойства материалов и на надежность полимерных изделий на этапе их эксплуатации.

Условия обеспечения надежности конструкций из полимерных материалов заключаются в том, чтобы расчетные значения напряжений, деформаций не превышали соответствующих им нормативных предельных значений. Таким образом, для обеспечения надежности необходимо определить допустимые изменения параметров, входящих в математическую модель вероятности безотказной работы изделия.

Важное значение имеет экспериментальное исследование влияния масштабного фактора на механические свойства ПП при воздействии естественных климатических факторов. Под старением полимерного материала понимается процесс необратимого изменения строения и состава, приводящий

к изменению его свойств. При старении происходит изменение одного или нескольких показателей свойств материала, определяющих его применение в изделии.

В настоящей работе изучалось старение материалов на основе полипропилена в четырех климатических зонах: умеренного климата, холодного климата, жаркого влажного климата и жаркого сухого климата.

В качестве предельных прочностных характеристик материалов на основе полипропилена в исходном состоянии и на начальных стадиях старения использовался предел текучести, на последних стадиях старения, когда образцы претерпевают хрупкое разрушение – прочность при растяжении. В исходном состоянии предел текучести равен прочности при растяжении

Изучение старения образцов малых толщин нестабилизированных материалов на основе полипропилена в условиях холодного климата показало его исключительную нестойкость, рис. 7.

Материалы МПП 15-04 и БСПЭ 22007-16 после первых месяцев экспонирования теряют блеск, после 6 месяцев хорошо заметна сеть микротрещин на поверхности образцов.

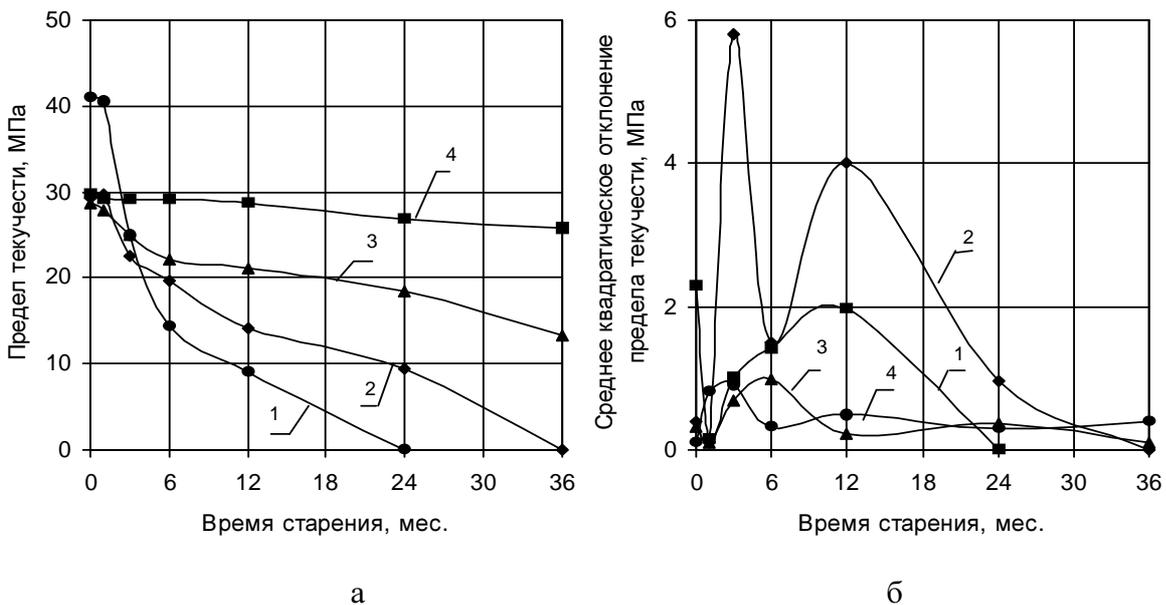


Рис. 7. Зависимость среднего значения – а и среднего квадратического отклонения - б предела текучести от времени старения (г. Якутск) для материала БСПЭ 22007-16, для образцов с площадью поперечного сечения 1 -  $1 \times 2,5 \text{ мм}^2$ ; 2 -  $2 \times 5 \text{ мм}^2$ , 3 -  $3 \times 13 \text{ мм}^2$ ; 4 –  $8 \times 25 \text{ мм}^2$

После 6 месяцев экспонирования у нестабилизированных материалов МПП 15-04 и БСПЭ 22007-16 резко уменьшается относительное удлинение при разрыве.

В связи с тем, что воздействие солнечного излучения вызывает изменение химической структуры в поверхностных слоях образцов, влияние этого процесса на свойства материала при естественном старении должно зависеть от

толщины образцов. С увеличением размеров образцов изменение деформационно-прочностных характеристик менее выражено.

Среднее квадратическое отклонение предела текучести при растяжении вначале с увеличением времени старения возрастает, а затем, после достижения предельного значения, снижается.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что кроме повышения морозостойкости композиций на основе полипропилена важным является фотостабилизация морозостойкого полипропилена. У материала МПП 15-04 901, стабилизированного техническим углеродом, не наблюдается существенного изменения свойств для различных толщин образцов.

Модуль упругости при растяжении за этот же период изменяется для морозостойкого ПП в зоне холодного климата у МПП 15-04 бесцветного с 1110 МПа до 725 МПа, а у МПП 15-04 черного с 1100 МПа до 880 МПа.

Прочность при растяжении не относится к чувствительной к старению характеристике, по которой можно оценивать стойкость материала к старению рис. 8.

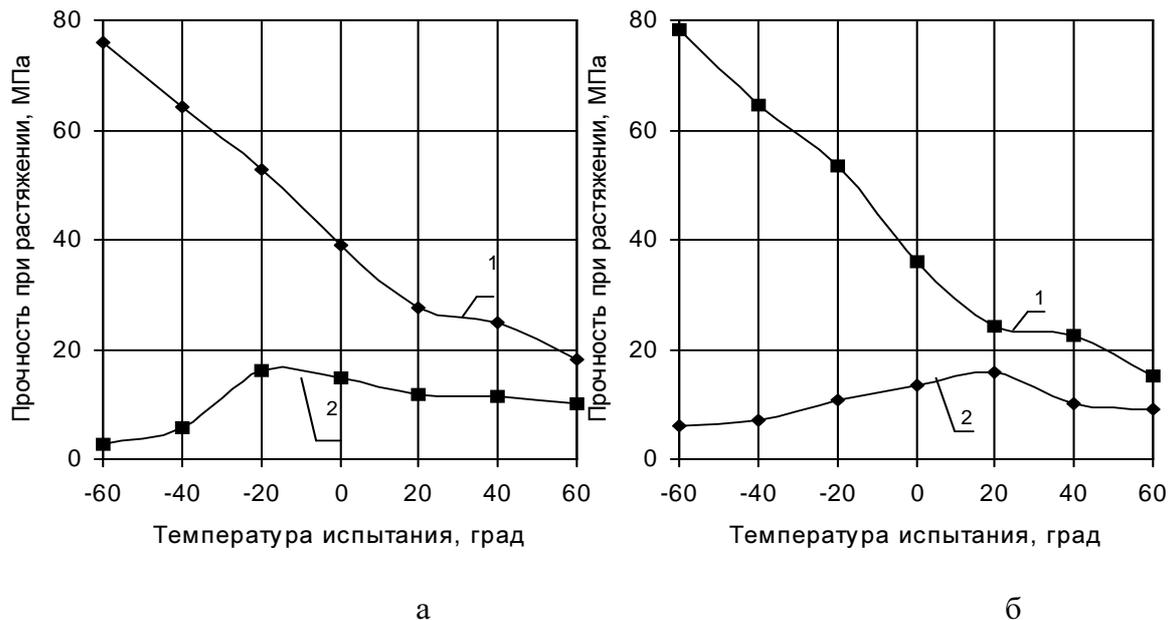


Рис. 8. Температурная зависимость прочности при растяжении для термопласта БСПЭ 22007-16 - а, и МПП 15-04, бесцветный, 1- исходная, 2 – после 18 месяцев старения в условиях холодного климата (г. Якутск)

Действительно, даже у нестабилизированных термопластов за 18 месяцев старения в условиях холодного климата прочность при испытаниях при 20<sup>0</sup>С по отношению к исходному значению уменьшается для термопласта БСПЭ 22007-16 более чем в два раза, а для термопласта МПП 15-04, бесцветного – в 1.5 раза. Эта потеря прочности резко увеличивается при понижении температуры испытания материала.

При испытаниях материалов при – 60<sup>0</sup>С, что соответствует нижней границе эксплуатационных температур, максимальная прочность при

растяжении для термопласта БСПЭ 22007-16 составляет 2.7 МПа, а для термопласта МПП 15-04, бесцветного – 6.1 МПа. При этом прочность по отношению к исходному значению при – 60 °С уменьшается для термопласта БСПЭ 22007-16 в 28 раз, а для термопласта МПП 15-04, бесцветного в 13 раз.

С целью получения достоверной информации о влиянии хранения на деформационно-прочностные свойства изделий из полимерных материалов на основе ПП, переработанных литьем под давлением были изготовлены образцы из различных марок термопластов на основе полипропилена четырех типоразмеров поперечных сечений.

Изготовленные образцы материалов на основе ПП хранились в отапливаемом складском помещении со стандартными параметрами хранения. За пять лет хранения у термопластов на основе гомополимера ПП и морозостойких марок ПП предел текучести незначительно увеличился, а у блок-сополимеров пропилен с этиленом предел текучести практически не изменился,

Известно, что одним из наиболее чувствительных к старению параметров является относительная деформация при разрыве. При уменьшении ее до значения относительной деформации при пределе текучести, полимерный материал становится хрупким, то есть наступает потеря его работоспособности.

В условиях холодного климата для бесцветных термопластов среднее значение относительного удлинения при разрыве уменьшается до значения относительной деформации при пределе текучести через полгода экспонирования образцов. Для термопластов МПП 15-06-901 и МПП 15-04-901 стабилизированных техническим углеродом среднее значение относительного удлинения при разрыве остается практически неизменным.

При аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов изменение относительной деформации при разрыве описывалось уравнением

$$\varepsilon_p(t) = a e^{-bt}, \quad (6)$$

где  $a$  и  $b$  – константы материала.

Константы исследуемых материалов при прогнозировании относительной деформации при разрыве в процессе старения приведены в табл. 5.

Таблица 5

Константы уравнения

Материал	Якутск		Томск	
	$a$	$b$	$a$	$b$
МПП 15-04, бесцв.	121	0,16	146	0,09
МПП 15-04-901, черн.	594	0,012	-	-
БСПЭ 22007-16	111	0,21	126	0,13
МПП 15-06, бесцв.	325	0,29	-	-
МПП 15-06-901, черн.	623	0,009	-	-
БСПЭ 22015-16	125	0,13	587	0,28
ПП 21060-16	372	0,41	931	0,37

На рис. 9 показана зависимость вероятности безотказной работы образцов, толщиной 2 мм по критерию климатической стойкости композиций ПП от времени старения в условиях холодного климата.

Задавая значение вероятности безотказной работы, можно определить климатическую стойкость материала по деформационному критерию. Так, для бесцветных термопластов рис. 9а при значении вероятности безотказной работы 0.95 стойкость МПП 15-04 составит 11 месяцев, а БСПЭ 22007-16 - 9 месяцев в условиях холодного климата.

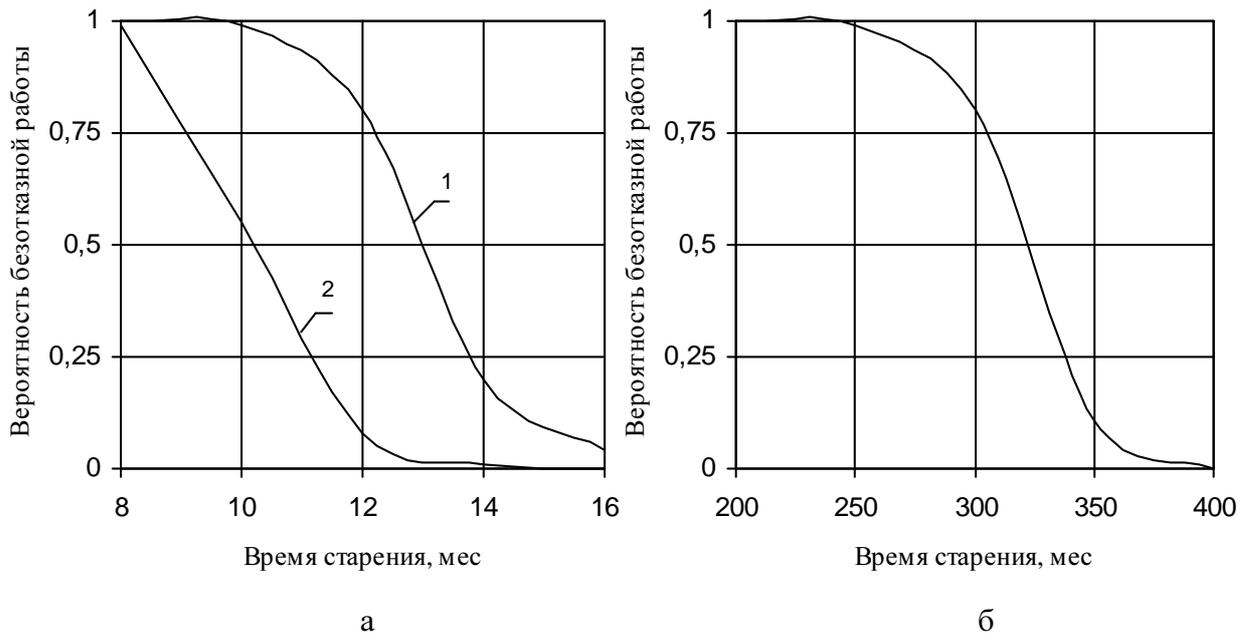


Рис. 9. Зависимость вероятности безотказной работы от времени старения термопластов на основе полипропилена в условиях холодного климата а - 1 –МПП 15-04, бесцветный; 2 – БСПЭ 22007-16, б - МПП 15-04-901

На рис. 9б показана зависимость вероятности безотказной работы от времени старения для материала МПП 15-04-901, стабилизированного техническим углеродом. При значении вероятности безотказной работы 0.95 его стойкость в условиях холодного климата составит около 23 лет.

На рис. 10а показана зависимость вероятности безотказной работы от ресурса изделий различных толщин для случая одноосного напряженного состояния из термопласта МПП 15-04 бесцветного в условиях умеренного климата.

Найденный 95 % ресурс изделий различных толщин, изготовленных из термопласта МПП 15-04 бесцветного, для случая одноосного напряженного состояния составляет: для 1 мм около 2200 часов, для 2 мм около 18000 часов, для 3 мм около 27000 часов, для 8 мм свыше 80000 часов.

На рис 10б приведена зависимость ресурсов изделий из полимерных композиционных материалов, работающих при одноосном и двухосном напряженном состоянии от толщины изделий. Видно, что увеличение ресурса в

интервале толщин изделий до 2 мм незначительно. В интервале толщин изделий с 2 до 8 мм ресурс возрастает с 1800 ч до почти  $10^5$  ч. Это объясняется влиянием толщины образцов на средние значения и средние квадратические отклонения параметров, входящих в модель расчета надежности по критерию прочности от воздействия естественных климатических факторов.

Для термопласта МПП 15-04-901, стабилизированного техническим углеродом, вероятность безотказной работы близка к единице и за ресурс 219000 час, что соответствует сроку службы 25 лет, для изделий различных толщин практически не изменяется.

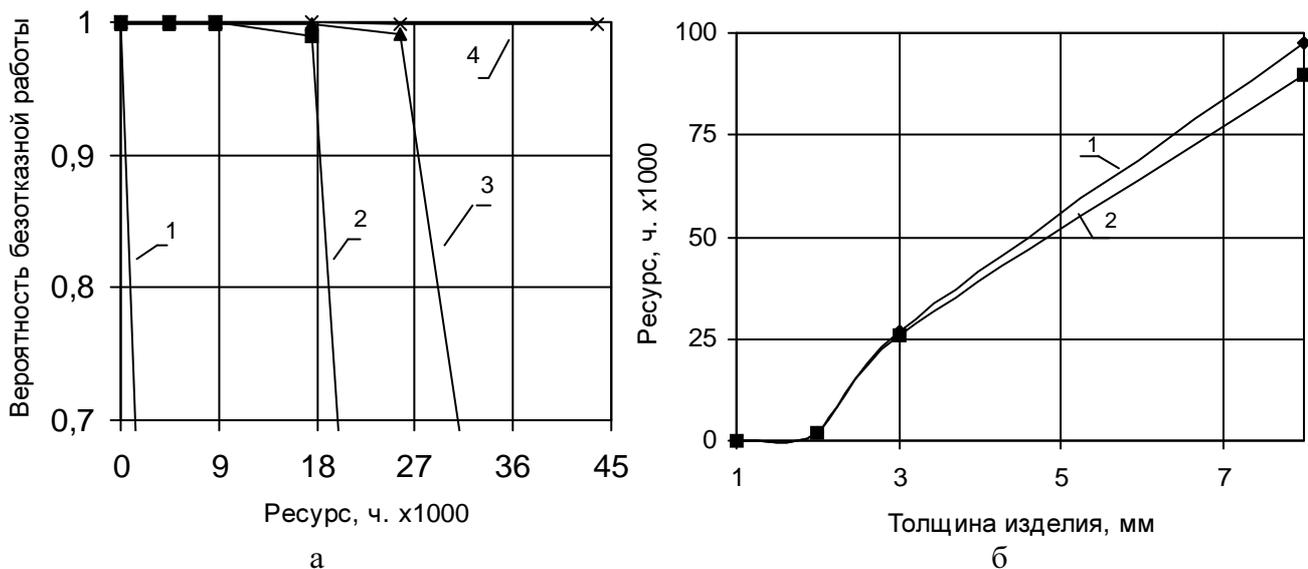


Рис. 10. Зависимость вероятности безотказной работы от ресурса изделий различных толщин термопласта МПП 15-04 бесцветного при одноосном напряженном состоянии в условиях умеренного климата, исходный коэффициент безопасности  $n=2$ , 1- 1 мм, 2- 2 мм, 3 – 3 мм, 4 – 8 мм – а; зависимость ресурсов изделий, работающих при одноосном -1 и двухосном -2 напряженном состоянии от толщины изделий – б

**В седьмом разделе** диссертационной работы рассмотрены вопросы прогнозирования надежности изделий из полимерных материалов.

Выполнены расчеты вероятности безотказной работы на примере трубы, нагруженной внутренним давлением. Было рассчитано приращение наружного диаметра на основе метода расчета толстостенных труб. На основе вероятностно-статистической модели определена вероятность того, что приращение наружного диаметра  $\Delta D$  не превысит допустимого значения. В качестве материалов трубы использовались термопласты МПП 15-04 и БСПЭ 22007-16.

Определение напряжений и деформаций в трубе с учетом нелинейного поведения материала осуществлялось с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в сочетании с процедурой последовательных нагружений. Для этого процесс нагружения рассматривается как последовательность равновесных состояний, причем каждые соседние состояния настолько близки,

что можно линеаризовать все соотношения по отношению к приращению переменных состояния. При расчете физическая нелинейность учитывается изменением модуля упругости на каждом этапе нагружения в соответствии с положением соответствующей точки на кривой  $\sigma \sim \varepsilon$ . Геометрическая нелинейность учитывается за счет перестроения сетки, движущейся вместе с деформируемой средой.

При вероятностно-статистическом подходе задаются управляющие параметры (прочностные, упругие, размерные) в соответствии с законом их распределения. Тогда в результате расчета получается вариант НДС, а проведение ряда аналогичных расчетов – численных экспериментов – дает набор данных о параметрах НДС, поддающихся статистическому анализу.

В табл. 6 приведены результаты расчета трубы из полимерных материалов МПП 15-04 и БСПЭ 22007-16 с учетом нелинейного поведения материала.

На рис. 11 показана зависимость вероятности безотказной работы трубы по критерию прочности из МПП 15-04 при температуре  $60^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 6

Расчетный параметр	МПП 15-04				БСПЭ 22007-16			
	Температура $20^{\circ}\text{C}$		Температура $60^{\circ}\text{C}$		Температура $20^{\circ}\text{C}$		Температура $60^{\circ}\text{C}$	
	Давление, МПа		Давление, МПа		Давление, МПа		Давление, МПа	
	1,0	1,7	1,0	1,7	1,0	1,7	1,0	1,7
Вероятность безотказной работы, R по критерию $\sigma_{\text{Экв}}$								
наружн. пов-ть	1	1	1	0,9973	1	1	1	0,9999
внутр. пов-ть	1	1	1	0,9865	1	1	1	0,9999

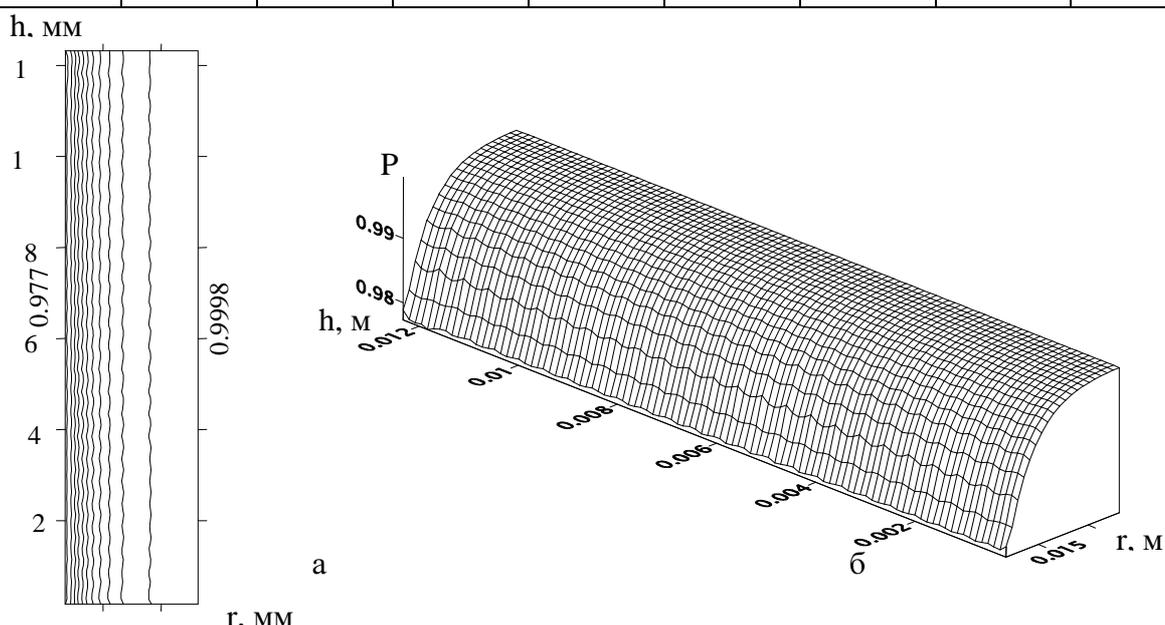


Рис. 11 . Вероятность безотказной работы трубы по критерию прочности; а – изолинии вероятности безотказной работы; б - вероятности безотказной работы по сечению трубы

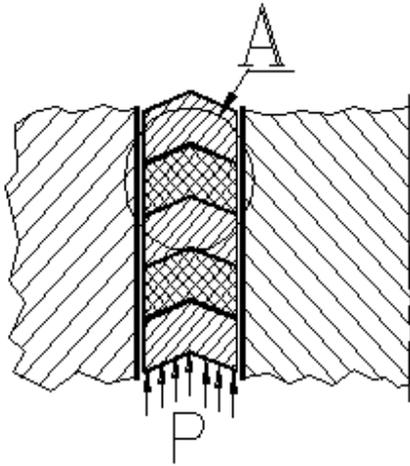


Рис. 12. Схема узла уплотнения клапана  
А - поверхности контакта полимерных колец с поджимающими металлическим кольцами

Для сравнения результатов расчета приращения наружного диаметра  $\Delta D$  с экспериментальными данными были изготовлены 25 макетов труб из термопласта БСПЭ 22007-16 длиной 125 мм, наружным диаметром 20 мм и внутренним диаметром 18 мм. Нагружение макетов трубы проводилось на экспериментальной установке при помощи поршневого насоса. Внутреннее давление поддерживалось на заданном уровне 0.71 МПа при температуре испытаний

293 °К. За результат измерения приращения наружного диаметра  $\Delta D$  для каждого макета рассчитывалось среднее арифметическое трех измерений по трем направлениям. Экспериментальное среднее значение  $\Delta D_{\text{эксп.}} = 0.81$  мм. Расчет среднего значения приращения наружного диаметра макета с учетом нелинейного поведения материала при том же уровне внутреннего давления составил  $\Delta D_{\text{расч.}} = 0.98$  мм, т.е. результаты расчета хорошо согласуются с результатами испытаний макетов.

На основе предложенного подхода рассчитана вероятность безотказной работы для узла сальникового уплотнения аварийного быстродействующего клапана реактора полиэтилена высокого давления. Конструктивно уплотнительный узел выполнен в виде серии полимерных композитных (на основе политетрафторэтилена) колец «шевронной» формы, чередующихся с металлическими кольцами.

Для определения параметров осесимметричного НДС решалась задача нелинейной теории упругости с помощью метода конечных элементов в сочетании с процедурой пошагового нагружения.

Показано, что наиболее напряженным участком полимерного уплотнительного кольца клапана (рис. 12) является вершина нижнего профиля кольца. В этой зоне соответственно возрастает вероятность разрушения и отказа изделия, получены количественные связи уровня напряжений (деформаций) с вероятностью отказа.

С целью выбора материала для трех композиций рассчитывалось влияние рассеяния модуля упругости материала и предела текучести на разброс параметров напряженно-деформированного состояния кольца. Рассеяние параметров материала задавалось с помощью датчика случайных чисел.

На рис. 13. показаны поверхность распределения вероятностей безотказной работы и изолинии для выбранной композиции.

Проведенные в условиях производства испытания показали, что изготовленные из разработанного материала уплотнительные узлы в течение года обеспечивают необходимую герметичность клапана в эксплуатационном режиме, и уплотнительные кольца рекомендованы к дальнейшему использованию в узлах уплотнения арматуры высокого давления вместо импортных аналогов.

Домостроительная система ЗАО «Союзполимерстрой» г. Томск (СОПОС), является вариантом новейшей теплоизоляционной бетонной системы для возведения стен и перекрытий. Отличительными особенностями технологии домостроительной системы «СОПОС» являются большой объем применения полимерных материалов.

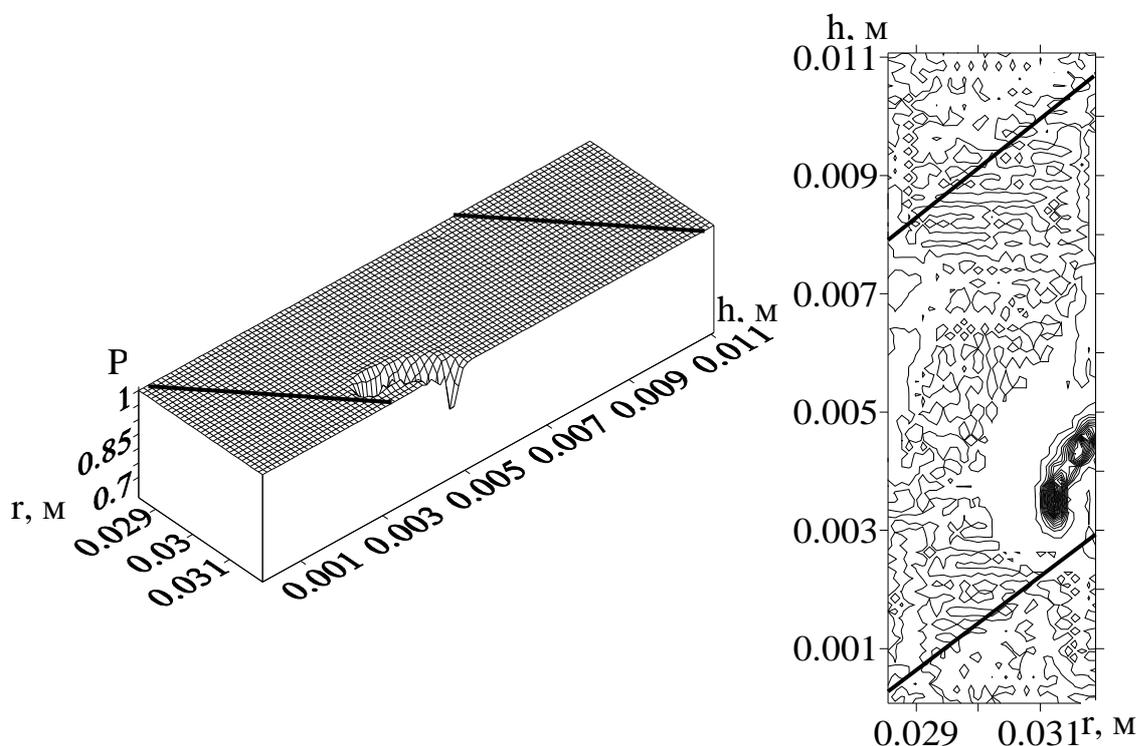


Рис. 13. Поверхность и изолинии распределения вероятностей безотказной работы уплотнительного кольца

На основе вероятностно-статистической модели определена несущая способность втулки крепления навесных конструкций внутри помещений. Внутренняя стена здания, построенного по технологии домостроительной системы СОПОС, выполняется из сдвоенных гипсоволокнистых листов (ГВЛ), установленных на внутренней стороне несъемной опалубки из пенополистирола. Для крепления навесных конструкций на внутренней стене здания используются специальные втулки из полипропилена ПП 21030-16. Втулки, своей наружной поверхностью устанавливаются в отверстия, выполненные в сдвоенных листах ГВЛ, и закрепляются с помощью анкера в бетонной части стены.

На анкеры, установленные во внутренней поверхности втулки, крепятся различные навесные конструкции: кронштейны для установки аппаратуры, навесные конструкции, шкафы и др.

Для частично-кристаллических материалов на основе полиолефинов предельным напряжением является напряжение текучести  $\sigma_T$  как напряжение, ограничивающее развитие больших пластических деформации. Среднее значение напряжений, при которых наблюдается текучесть материала втулки  $\sigma_T = 15.60$  МПа, среднее квадратическое отклонение напряжения  $S_{\sigma T} = 0.73$  МПа. Вероятность безотказной работы равна 0.96 при нагрузке на втулку 800 Н.

Кроме того, на основе разработанных вероятностно-статистических моделей рассчитаны вероятность безотказной работы полимерного покрытия на основе эпоксидной композиции в эксплуатационном диапазоне температур и стержневых перемычек из полипропилена для несъемной опалубки.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В работе предложен и реализован новый подход к решению проблемы прогнозирования надежности изделий и конструкций из полимерных композиционных материалов с использованием новых и усовершенствованных вероятностно-статистических моделей, основанный на применении больших массивов экспериментальных данных в сочетании с методами численными анализа напряженно-деформированного состояния изделий.
2. Разработаны устройства, защищенные авторскими свидетельствами на изобретения, для экспериментального исследования полимерных материалов и получения комплекса деформационных, упругих, усадочных, дилатометрических и др. характеристик.
3. Обобщены экспериментально выявленные статистические закономерности влияния на этапе проектирования на надежность изделий следующих факторов: рассеяния деформационно-прочностных и усадочных характеристик, концентраторов напряжений, масштабного эффекта.

При увеличении площади поперечного сечения образцов с 2.5 до 200 мм<sup>2</sup> предел текучести термопластов на основе полипропилена уменьшается в 1.5 раза, относительная деформация при разрыве в 2...4 раза. Коэффициент чувствительности к концентрации напряжений для исследованных материалов увеличивается с ростом поперечного сечения образцов.

Установлено, что характеристики термопластов на основе ПП, входящие в вероятностно-статистическую модель расчета надежности имеют коэффициент вариации для модуля упругости 7...8 %, для коэффициента Пуассона 5...6 %, для коэффициента линейного теплового расширения 10...12 %, для предела текучести 1...4 %.

4. Получен статистически достоверный объем экспериментальных данных о влиянии производственных, технологических отходов, режимов переработки на усадочные, деформационно-прочностные характеристики полимерных материалов на этапе производства изделий. Установлено, что деформационно-прочностные свойства образцов из смесей отходов производства полипропилена (до 50% наполненного полипропилена в смеси) находятся в пределах требований к основным показателям для базовых и наполненных марок ПП. Это позволило использовать для производства нагруженных изделий из полимерных материалов вторичное сырье, а именно, производственные и технологические отходы.

5. Выявлены закономерности изменения характеристик, определяющих надежность изделий под воздействием естественных и искусственных климатических факторов на этапе эксплуатации. Показано влияние толщины образцов бесцветных термопластов на стойкость к старению.

Установлено на примере термопластов МПП 15-04 901, МПП 15-06 901 стабилизированных техническим углеродом, в течение трех лет экспонирования во всех климатических зонах практически не происходит изменения прочностных свойств, что позволяет рекомендовать при использовании изделий и конструкций из термопластов на основе ПП эксплуатирующихся под воздействием естественных климатических факторов фотостабилизацию техническим углеродом.

6. Разработан новый метод расчета статистических показателей эффективных свойств наполненных полимерных композиций с учетом рассеяния свойств фаз на основе физико-математической модели структурно-неоднородной среды с применением численного моделирования.

7. Разработан метод оценки вероятности безотказной работы конструкции с учетом нелинейного поведения материала на основе численного анализа методом конечных элементов (МКЭ) в сочетании с процедурой последовательных нагружений с проведением статистического моделирования.

8. Разработан метод построения полей вероятности безотказной работы в изделиях из полимерных композиционных материалов на основе численного эксперимента с учетом нестабильности свойств полимерных материалов, отклонения геометрии изделий и параметров нагрузки от их номинальных значений.

9. Разработан метод прогнозирования ресурса для типовых расчетных схем нагруженных изделий из полимерных материалов.

Установлена зависимость ресурса от толщины изделий, работающих при воздействии естественных климатических факторов. Увеличение ресурса в интервале толщин изделий до 2 мм незначительно. В условиях умеренного климата, в интервале толщин изделий с 2 до 8 мм ресурс возрастает с 1800 ч до почти 100 000 ч.

Для изделий из термопласта МПП 15-04-901, стабилизированного техническим углеродом, ресурс составляет 219 000 ч, что соответствует сроку службы 25 лет.

10. Реализация результатов исследований осуществлена в СКБ ПО «Сибэлектромотор», ЗАО «Пластполимер» г. Томск, ЗАО «Союзполимерстрой» г. Томск, ООО «Томскнефтехим», Югорском институте развития строительного комплекса, г. Ханты-Мансийск.

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Реутов, А.И. Прогнозирование надежности строительных изделий из полимерных материалов: монография / А.И. Реутов. – М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2007. – 184 с.
2. А.с. 785199 СССР, МКИ<sup>3</sup> G 01 N 25/16. Устройство для определения коэффициента линейного теплового расширения полимерных материалов / К.Н. Кан, О.В. Лавренев, А.И. Реутов и др. (СССР). №2714906/18-25; Заяв. 18.01.79; Оpubл. 07.12.80, Бюл. № 45. – 2 с.: ил.
3. А.с. 1105795 СССР.- МКИ<sup>3</sup> G 01 N 25/16. Устройство для измерения усадки полимерных материалов / Бикбаев Р.С., Реутов А.И., Фишко В.Н. (СССР). №3509809/18-25; Заяв. 01.11.82. - Оpubл. 30.07.84, Бюл. № 28. – 2 с.: ил.
4. Реутов, А.И. Статистическое исследование технологической усадки полимерных образцов на основе полипропилена / А.И. Реутов, Ю.Г. Садовников // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Технология производства и оборудование. – 1985. – Вып. 2. – С. 18-21.
5. Реутов, А.И. Длительная прочность полимерных гибридов на основе полипропилена / А.И. Реутов, Ю.И. Реутов, В.Н. Фишко // В сб. Томского политехнического института, 1985, с. 16-19. - Деп. в НИИТЭХИМ, № 60-хп.
6. Реутов, А.И. Влияние режимов литья под давлением на усадочные и деформационно-прочностные характеристики полимерных материалов на основе полипропилена / А.И. Реутов, Ю.Г. Садовников // В сб. Томского политехнического института, 1985, с. 20-24. - Деп. в НИИТЭХИМ, № 60-хп.
7. Прогнозирование изменения размеров изделий из пластмасс при старении / А.И. Реутов, Ю.Г. Садовников // Старение полимерных материалов и изделий: Сборник научных трудов. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1986. – С. 70-74.
8. Кан К.Н. Прогнозирование надежности изделий из полимерных композитных материалов для условий ползучести и релаксации напряжений / К.Н. Кан, А.И. Реутов, Ю.И. Реутов, В.Н. Фишко // Механика композитных материалов. – 1987. – № 4. С. 734-738.
9. А.с. 1229608 СССР.- МКИ<sup>3</sup> G 01 L 1/06. Устройство для измерения механических напряжений / Бикбаев Р.С., Реутов А.И., Реутов Ю.И., Фишко

- В.Н. (СССР). №3814525/24-10; Заяв. 10.10.84; Оpubл. 07.05.86, Бюл. № 17. – 2 с.: ил.
10. А.с. 1415034 СССР.- МКИ<sup>3</sup> G 01 B 5/30. Тензомер для измерения продольной и поперечной деформации образца / Реутов А.И., Реутов Ю.И., Садовников Ю.Г., Шатохин А.Е. (СССР). №4181448/25-28; Заяв. 15.01.87; Оpubл. 07.08.88, Бюл. № 29. – 2 с.: ил.
11. Влияние масштабного фактора на деформационно-прочностные характеристики конструкционных материалов на основе полипропилена / А.И. Реутов, А.Е. Шатохин – В кн: Физико-химические исследования новых конструкционных материалов. Томск: ТФ СО АН СССР, 1988 г. С. 80-83.
12. Толстов, Г.П. Свойства производственных отходов полипропилена / Г.П.Толстов, И.Л. Костюк, А.И. Реутов и др. // Пластические массы. – 1988. – № 3. – С. 60.
13. А.с. 1601509 СССР, МКИ<sup>3</sup> G 01 L 1/06. Приспособление для нанесения сеток на поверхность образца / Бикбаев Р.С., Реутов А.И., Шатохин А.Е. (СССР). №4369986/24-10; Заяв. 01.02.88; Оpubл. 22.06.90, Бюл. № 39. – 2 с.: ил.
14. Реутов, А.И. Влияние масштабного фактора на деформационно-прочностные конструкционных материалов на основе полипропилена / А.И. Реутов, Р.С. Бикбаев, А.Е. Шатохин // Пластические массы. – № 6. – 1990. – С. 56-57.
15. Прогнозирование климатической устойчивости материалов на основе полипропилена / И.С. Филатов, П.Е. Никитин, А.И. Реутов, А.В. Братчиков. – В кн.: Релаксационные свойства полимерных материалов. – Воронеж, 1990. – С. 24-26.
16. Реутов, А.И. Особенности компьютерного конструирования и создания полимерных компаундов / А.И. Реутов, Ю.И. Реутов // IV Международная научная конференция "CADAMT'95. Компьютерное конструирование перспективных материалов и технологий": Тезисы докладов. – Томск: Изд-во Российского материаловедческого центра, 1995. – С. 76-77.
17. Reutov, A.I. Prediction of the Reliability of Plastic Products / Y.I. Reutov, A.I. Reutov, A.A. Sidorenko // The 4 Korea-Russia Int. Symp. of Science and Technology. KORUS, 2000. Vol., p. 199-203.
18. Reutov, A.I. Structural - statistical Analysis of Reasons of Construction Elements Breaking / B.A. Ljukshin, P.A. Ljukshin, Y.I. Reutov, A.I. Reutov // The 4 Korea-Russia Int. Symp. of Science and Technology. KORUS, 2000. Vol., p. 194-198.
19. Ljukshin, B.A. Strength Computer Design of Filled Polymeric Compositions with Regard to Matrix Ageing / B.A. Ljukshin, P.A. Ljukshin, N.Ju. Matolygina, A.I. Reutov // The 5 Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. KORUS, 2001. Vol.2, p. 211-212.
20. Reutov, A.I. The Analysis of Statistical Model of Reliability at Normal Distribution of Strength and Stress for Products from Polymeric Materials / A.I.

- Reutov, Y.I. Reutov // The 5 Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. KORUS, 2001. Vol.2, p. 217-219.
21. Реутов, А.И. Оценка климатической устойчивости полимерных материалов на основе вероятностно-статистического метода / А.И. Реутов, А.А. Сидоренко, И.С.Филатов // Известия ТПУ. – 2002. – т.305, Вып.5. – С. 196-203.
22. Реутов, А.И. Проблемы качества изделий из вторичных полимерных материалов / А.И. Реутов, Ю.И. Реутов, А.Р.Грошев // Известия ТПУ. – 2002. – т.305, Вып. 5. – С. 192-196.
23. Reutov, A.I. Reliability of Plastic Product at Stage of Design, Manufacturing and Exploitation // 7th Korean-Russian International Symposium on Science and Technology. KORUS, 2003. Vol.1, p.355-359.
24. Bochkareva, S.A. Investigation of the influence of specimen shape and size on measured strain and strength characteristics / S.A.Bochkareva, B.A.Ljukshin, P.A.Ljukshin, N.Ju.Matolygina, A.I.Reutov // Abstracts of the Int. workshop “Mesomechanics: Fundamentals and Applications” (MESO’2003) and the VII Int. conf. “Computer aided design of advanced materials and technologies” (CADAMT’2003). Томск: 2003, с. 212-213.
25. Бочкарева, С.А. Влияние разброса свойств фаз в полимерной композиции конструкционного назначения на ее деформационно-прочностные свойства и вероятность безотказной работы конструкций / С.А. Бочкарева, Б.А. Люкшин, А.И. Реутов // Фундаментальные и прикладные проблемы механики: Доклады конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – С. 178-179.
26. Бочкарева, С.А. Определение вероятности безотказной работы конструкций из полимерных материалов / С.А. Бочкарева, Б.А. Люкшин, А.И. Реутов // Физическая мезомеханика. – 2004. – спец. вып. 7, ч. I. – С. 43-45.
27. Бочкарева, С.А. Оценка надежности конструкций из полимерных композитных материалов / С.А. Бочкарева, Б.А. Люкшин, А.И. Реутов // Известия ТПУ. – 2004. – т.307, № 6. – С. 60-64.
28. Реутов, А.И. Обеспечение точности изделий строительного назначения из вторичных полимерных материалов / А.И. Реутов // Известия вузов. Строительство. – 2004. –№ 6. – С. 41-45.
29. Реутов, А.И. Обеспечение надежности нагруженных изделий строительного назначения из вторичных полимерных материалов / А.И. Реутов // Известия вузов. Строительство. – 2004. –№ 7. – С. 54-59.
30. Реутов, А.И. Обеспечение надежности нагруженных строительных изделий из полимерных материалов на этапах проектирования, производства и эксплуатации / А.И. Реутов // Строительные материалы. – 2004. – № 4. – С. 46-49.
31. Реутов, А.И. Полимерные материалы в домостроительной системе СОПОС / А.И. Реутов, Р. А. Жаркой // Строительные материалы. – 2005. – № 4. – С. 11-12.

32. Бочкарева, С.А. Компьютерное конструирование материалов с учетом требований надежности / С.А. Бочкарева, Б.А. Люкшин, Ю.В. Осипов, А.И. Реутов // Аннотации докладов IX Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике – Н. Новгород, 22-28.08.2006, т. III, изд-во Нижегородского ун-та, 2006. – С. 44-45.
33. Бочкарева, С.А. Оценка влияния статистического разброса свойств матрицы на свойства наполненной полимерной композиции / С.А. Бочкарева, А.И. Реутов, О.С. Жданова // Фундаментальные и прикладные проблемы механики: Доклады конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2008. – С. 162-163.
34. Реутов, А.И. Надежность строительных изделий и конструкций из полимерных материалов / А.И. Реутов // Вестник ТГАСУ. – 2009. – № 1. – С. 126-141.
35. Реутов, А.И. Прогнозирование климатической стойкости полимерных материалов, применяемых в строительстве / А.И. Реутов // Вестник ТГАСУ. – 2009. – №2. – С. 127-141.
36. Бочкарева, С.А. Влияние разброса упругих свойств матрицы на эффективный модуль упругости наполненной полимерной композиции / С.А. Бочкарева, А.И. Реутов, О.С. Жданова // Физическая мезомеханика. – 2009. – том 12, №6. – С. 97-100.
37. Реутов, А.И. Надежность изделий из полимерных композиционных материалов с учетом статистической изменчивости их характеристик / А.И. Реутов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 2. – С. 58-62.



Тираж 100. Заказ № 634.  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.  
Тел.: 53-30-18.