

На правах рукописи



КАНАЕВА НАДЕЖДА СЕРГЕЕВНА

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ
ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ С УЧЕТОМ
КЛИМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Воронеж 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва».

Научный руководитель:

советник РААСН,
доктор технических наук, профессор
Низина Татьяна Анатольевна

Официальные оппоненты:

Сулейманов Альфред Мидхатович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»,
заведующий кафедрой строительных
материалов

Пичугин Анатолий Петрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный аграрный университет»,
главный научный сотрудник

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Пензенский государствен-
ный университет архитектуры и
строительства»**

Защита диссертации состоится 22 декабря 2023 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, ауд. 101 бизнес-инкубатор.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «26» октября 2023 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Макеев
Алексей Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ключевым направлением в технологическом развитии Российской Федерации является разработка и внедрение новых материалов и технологий их производства. В то же время появление широкого спектра новых высокотехнологичных материалов, в том числе на полимерной основе, и ужесточение применяемых к ним нормативных требований приводит к необходимости совершенствования методик комплексных исследований свойств и повышения достоверности их прогнозирования.

Полимеры нашли широкое применение в строительной отрасли в качестве конструкционных и защитных материалов. Устойчивость к действию циклических механических нагрузок представляет собой один из наиболее важных критериев обеспечения долговечной работы полимерных материалов. При этом в реальных условиях эксплуатации действие механических нагрузок, как правило, осложнено влиянием климатических факторов, агрессивных сред, физических полей, причем возникающий синергетический эффект превосходит действие каждого из факторов по отдельности. Однако, учет синергии совместного воздействия, как правило, не учитывается вследствие высокой комплексности возникающих процессов и механизмов. Наиболее сложными в этом контексте являются оценка и прогнозирование изменения свойств материалов в условиях действия натуральных климатических факторов, что объясняется существенным диапазоном варьирования и относительной «непредсказуемостью» формирования действующих факторов. Влияние натуральных климатических факторов, концентрации сорбированной влаги и динамического воздействия образуют сложные закономерности накопления повреждений и формирования условий разрушения полимеров, что представляет собой большие массивы данных (Big Data), совместный анализ которых является важной научно-исследовательской задачей.

Данная работа является логическим развитием исследований химической и климатической стойкости полимерных материалов, выполняемых на базе Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва в рамках деятельности Научной Школы академика РААСН Владимира Павловича Селяева. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 20-38-90287 «Количественная оценка влияния натуральных климатических факторов на динамическую усталость и долговечность полимерных композитов».

Степень разработанности темы исследования.

При выполнении диссертационной работы был проведен обзор научно-технической литературы по: области применения полимерных материалов и их основным характеристикам; старению полимерных материалов (ПМ) под действием климатических факторов; накоплению повреждений и формированию условий разрушения в структуре полимеров; методам оценки кинетики накопления повреждений в структуре полимерных материалов под действием механических нагрузок. Теоретическими основами работы стали исследования отечественных и зарубежных учёных: Л.А. Абдрахмановой, К.К. Анискевича, А.А. Аскадского, Ю.М. Баженова, Г.М. Бартенева, Л. Больцмана, В.С. Бондаря, П.В. Боркова, В.Э. Вильдемана,

В.Л. Гилярова, Е.М. Готлиб, В.Т. Ерофеева, В.А. Ефимова, С.Н. Журкова, Е.Н. Каблова, Л.М. Качанова, В.Н. Кириллова, Ф. Кольрауша, А.М. Лощенко, Т.А. Мацевич, Т.А. Низиной, В.В. Новожилова, Ю.Н. Работнова, Н.Н. Павлова, Г.Г. Савенкова, В.П. Селяева, Ю.А. Соколовой, В.И. Соломатова, О.В. Старцева, В.О. Старцева, А.М. Сулейманова, А.А. Тагер, В.П. Тамужа, В.Г. Хозина, Г. Хофф, В.П. Ярцева, Т.А. Collins, P.J. Groot, E.S. Kong и других ученых.

Несмотря на наличие значительного числа исследований, посвященных полимерным материалам, их свойствам, химической и климатической стойкости, комплексных исследований влияния циклических нагружений, количественных факторов окружающей среды, а также влажностного состояния полимерных образцов на данный момент не выявлено. Внедрение новых полимерных материалов в практику строительства, ужесточение применяемых к ним нормативных требований влечет за собой необходимость исследования закономерностей возникновения и развития дефектных структур, изучения стадийности накопления повреждений в процессе циклического нагружения, идентификации механизмов разрушения с использованием современного оборудования и разработки методов анализа кинетики накопления повреждений в структуре полимерных материалов.

Цель диссертационного исследования заключается в разработке методики прогнозирования поведения эпоксидных полимеров под действием циклических нагружений с учетом натурального климатического старения, основанной на анализе кинетики накопления повреждений в структуре материала.

Научная гипотеза. Исходной ведущей научной гипотезой диссертационного исследования является предположение о том, что для количественной оценки динамической усталости полимерных материалов и изделий на их основе, подвергаемых натурному климатическому старению при воздействии циклических механических нагрузок, могут быть использованы показатели уровней накопленных повреждений, определяемых по кривым деформирования, фиксируемым с высокой частотой снятия показаний, с применением методов фрактального анализа. При этом оценка динамической усталости эпоксидных полимеров должна осуществляться с обязательным учетом их влажностного состояния, варьирующегося в процессе натурального климатического экспонирования, а также количественных факторов окружающей среды.

Исходя из поставленной цели и на основе выдвинутой ведущей научной гипотезы определены **основные задачи диссертационного исследования**:

1) разработать алгоритм определения количественных значений кинетики накопления повреждений в структуре полимерной матрицы по кривым деформирования, фиксируемым с высокой частотой снятия показаний при испытании образцов полимерных материалов под действием циклических механических нагрузок;

2) установить влияние влагосодержания на характер протекания процесса накопления усталостных дефектов, в том числе в предельных равновесно-влажностных состояниях (высушенном и влагонасыщенном);

3) определить вклад натурального климатического старения в изменение динамической усталостной прочности полимерных материалов в зависимости от количественных значений действующих факторов окружающей среды;

4) установить взаимосвязь между числом накопленных отказов в структуре полимерной матрицы под действием циклических механических нагрузок, влагосодержанием образцов, количественными значениями факторов окружающей среды и динамической усталостной прочностью;

5) исследовать процессы релаксации напряжений в полимерных материалах в зависимости от уровня прикладываемого начального напряжения, интенсивности климатического воздействия и влажностного состояния образцов эпоксидных полимеров с целью выявления лимитирующей стадии протекающих релаксационных процессов;

6) разработать математические модели, позволяющие с высокой достоверностью прогнозировать изменение эксплуатационных характеристик эпоксидных полимеров, в том числе динамической усталостной прочности, в зависимости от уровня циклического нагружения, числа циклов, влагосодержания и количественных факторов окружающей среды.

Научная новизна работы.

1. Впервые предложен критерий $\theta_{\text{разр.}}$ для оценки динамической усталости эпоксидных полимеров от комплекса климатических воздействий и режимов циклического нагружения, представляющий собой отношение числа накопленных повреждений в материале на единицу его прочности. Выявлена корреляционная зависимость между критерием $\theta_{\text{разр.}}$ и пределом прочности при растяжении, с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0,960$) описываемая одним степенным уравнением для всех исследуемых составов с учетом влажностного состояния полимерных материалов.

2. Установлено влияние влагосодержания на характер протекания процесса накопления повреждений, в том числе, в предельных равновесно-влажностных состояниях (высушенном и влагонасыщенном). Выявлено, что для всех исследуемых составов эпоксидных полимеров в контрольном состоянии (до климатического старения) удаление из образцов свободной влаги приводит к увеличению относительного удлинения, предела прочности и модуля упругости при растяжении, а также прочности при разрыве, что свидетельствует об обратимости влияния влаги на комплекс упруго-прочностных показателей. При этом повышение концентрации влаги в структуре полимера Этал-247/Этал-45TZ₂ (от высушенного до влагонасыщенного) сопровождается увеличением относительного удлинения при разрыве в 4,2 раза, что свидетельствует о смене характера деформирования при превышении некоторого критического уровня влагосодержания.

3. Доказана универсальность предложенного критерия $\theta_{\text{разр.}}$ для установления взаимосвязи между уровнем накопленных повреждений в структуре полимерной матрицы под действием циклических механических нагрузок, динамической усталостной прочностью, влагосодержанием и количественными значениями факторов окружающей среды. На основе метода главных компонент разработаны математические модели, позволяющие с высокой степенью достоверности прогнозировать изменение свойств эпоксидных полимеров в зависимости от вышеуказанных факторов.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов прогнозирования изменения свойств полимерных материалов в условиях воздействия природных климатических факторов на основе применения универсального критерия (удельного показателя $\theta_{\text{разр.}}$), позволяющего оценить уровень накопления повреждений в зависимости от циклического механического нагружения.

Разработаны математические модели для оценки стойкости полимеров на основе эпоксидных связующих, которые могут быть использованы как основа для прогнозирования их долговечности под действием динамических нагрузок и факторов окружающей среды.

Практическая значимость работы.

1. Разработанная методика позволяет проводить оценку кинетики накопления повреждений в зависимости от уровня растягивающих напряжений и относительного удлинения, количественно оценивать суммарное число отказов при циклическом нагружении и на этапе разрушения.

2. Разработанные математические модели позволяют прогнозировать изменение относительного удлинения, предела прочности и модуля упругости при растяжении, а также удельного показателя $\theta_{\text{разр.}}$ в зависимости от влагосодержания полимеров и уровня накопленной солнечной радиации.

3. С целью выявления реальной работоспособности полимерных материалов подтверждена необходимость оценки упруго-прочностных показателей полимеров, подвергаемых воздействию натурального климатического старения, не только сразу после съема с испытательной площадки (серия «без кондиционирования»), а и в граничных влажностных состояниях (серии «высушенные» и «влагонасыщенные»).

4. Установлено, что наибольшей устойчивостью в условиях климатического воздействия факторов окружающей среды обладает полимер на основе эпоксидной смолы Этал-247, отверждаемый полиаминным отвердителем Этал-1472, наименьшей – полиамидным отвердителем Этал-45TZ₂, что позволяет определить область эксплуатации полимеров в зависимости от вида используемых отвердителей.

5. Разработанные программные комплексы для ЭВМ позволяют автоматизировать расчет локальных и интегральных индексов фрактальности кривых деформирования образцов полимерных материалов (№2022612647) и параметров уравнений Больцмана-Вольтерры для описания процессов релаксации полимерных материалов (№ 2022666240).

Методология и методы диссертационного исследования. Методологическими принципами, которые легли в основу диссертационного исследования, послужили результаты фундаментальных и прикладных исследований отечественных и зарубежных ученых в области: климатической стойкости полимеров; накопления повреждений и формирования условий разрушения в полимерных материалах; методов оценки кинетики накопления повреждений в структуре полимеров под действием механических нагрузок. Методическую основу диссертационной работы составляют физико-механические методы испытаний, статистические методы обработки, анализа и оптимизации результатов экспериментальных исследований.

Проведение экспериментальных исследований осуществлялось с применением действующих ГОСТ и современных аналитических способов определения свойств полимерных материалов. При исследовании характеристик составов полимерных материалов применялись методы испытаний, регламентированные нормативными документами, а также приборы и оборудование, прошедшие поверку и удовлетворяющие требованиям действующих стандартов.

Положения, выносимые на защиту:

- методика определения количественных значений кинетики накопления повреждений в структуре полимерных образцов, подвергаемых воздействию циклических механических нагрузок;

- математические модели, описывающие изменение упруго-прочностных характеристик и количественных показателей накопленных повреждений в зависимости от уровня циклического воздействия, количества циклов и влажностного состояния образцов полимеров на основе эпоксидной смолы Этал-247;

- зависимости релаксационных показателей полимерных материалов от содержания сорбированной атмосферной влаги, уровня начального релаксирующего напряжения и интенсивности натурального климатического воздействия;

- корреляционные зависимости между критерием $\theta_{\text{разр.}}$, характеризующим уровень накопленных повреждений в структуре полимерных матриц под действием циклических механических нагрузок, динамической усталостной прочностью и количественными значениями факторов окружающей среды;

- математические модели, разработанные с использованием метода главных компонент, позволяющие с высокой степенью достоверности прогнозировать изменение свойств эпоксидных полимеров в зависимости от уровня циклического нагружения при растяжении, числа циклов, концентрации влаги в структуре полимеров и накопленного уровня солнечной радиации, используемого в качестве основной количественной оценки интенсивности натурального климатического воздействия.

Достоверность полученных результатов и выводов по диссертационному исследованию обеспечивается сходимостью большого числа экспериментальных данных, полученных с применением сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования; проведением экспериментальных исследований с достаточной воспроизводимостью; сходимостью теоретических решений с экспериментальными данными, их непротиворечивостью известным закономерностям.

Апробация результатов исследований. Основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях: V Международная конференция «Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур» (Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures), Уральский федеральный университет (г. Екатеринбург, 2019); 12th International DAAAM Baltic Conference and 27th International Baltic Conference BALTMATRIB 2019 (Tallinn, 2019); Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций» (г. Саранск, 2019); Национальная научно-техническая конференция с международным

участием «Эффективные материалы и технологии для транспортного и сельскохозяйственного строительства», (г. Новосибирск, 2020); Международная научная конференция «BuildInTech BIT 2020. Инновации и технологии в строительстве» (г. Белгород, 2020); V Всероссийская научно-техническая конференция «Климат–2020: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы» (2020); VI Международная конференция «Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур» (г. Екатеринбург, 2020); VI Всероссийская научно-техническая конференция «Климат-2021: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы» (г. Геленджик, 2021); XVII Международная научно-практическая конференция «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения» (г. Нальчик, 2021); XXX Всероссийская школа-конференция «Математическое моделирование в естественных науках-2021» (г. Пермь, 2021); II Scientific Conference Modelling and methods of structural analysis MMSA-2021 (Moscow, 2021); XII Ежегодная конференция Нанотехнологического общества России (г. Москва, 2021); XV Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (г. Новосибирск, 2022).

Внедрение результатов работы. Разработанная методика оценки кинетики накопления повреждений при циклическом деформировании образцов полимерных материалов, основанная на использовании методов фрактального анализа временных рядов, принята к использованию ООО «Центр Полимерных Композитов» (Республика Мордовия, г. Рузаевка).

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» (профиль «Промышленное и гражданское строительство»), магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» (профиль «Фундаментальные основы прогнозирования и повышения надёжности, долговечности строительных материалов, конструкций зданий и сооружений») и специалистов по направлению 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» (профиль «Строительство высотных и большепролетных зданий и сооружений»).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в 33 научных публикациях, в том числе в 5 статьях, опубликованных в российских рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при МОиН РФ, и 9 статьях в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и систем цитирования Web of Science и Scopus. Зарегистрировано 2 программных комплекса для ЭВМ.

Личный вклад автора. Совместно с научным руководителем выбрано направление исследования, проведена постановка научной задачи и составление плана работ. Соискателем лично выполнены экспериментальные исследования, проведена статистическая обработка и анализ полученного массива экспериментальных данных, разработаны математические модели, сформулированы основные выводы. Совместно с научным руководителем и соавторами подготовлены и опубликованы статьи в научных журналах, разработаны и зарегистрированы программные комплексы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения,

шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 275 страницах машинописного текста, включающего 106 рисунков, 47 таблиц, семь приложений (на 36 страницах). Библиографический список включает 211 наименований.

Область исследования диссертационной работы соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки), в частности пунктам направления исследований: п. 11. Разработка методов прогнозирования и оценки долговечности строительных материалов и изделий в заданных условиях эксплуатации; п. 17 Развитие системы контроля и оценки качества строительных материалов и изделий.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность представителям ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» – заведующему кафедры строительных конструкций, академику РААСН, д-ру техн. наук, профессору В.П. Селяеву, старшему научному сотруднику научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз, канд. техн. наук Д.Р. Низину за участие в обсуждении результатов работы. Автор благодарит за помощь при проведении части экспериментальных исследований ведущего инженера кафедры физического материаловедения А.Ф. Сигачева.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе по результатам обзора научно-технической и нормативной литературы установлено, что, несмотря на широкое применение полимеров практически во всех существующих областях промышленности, комплексных исследований, посвященных прогнозированию динамической усталости с учетом климатического воздействия сравнительно немного, что объясняется, в первую очередь, их длительностью и сложностью комплексного учета действующих факторов. При этом исследование динамической усталостной прочности полимерных материалов, эксплуатируемых в условиях действия натуральных климатических факторов, является особенно актуальным при внедрении новых материалов в практику строительства.

Во второй главе приведены основные характеристики применяемых материалов, описаны методы планирования и проведения экспериментальных исследований. В качестве объектов исследования были выбраны эпоксидные полимеры (ЭП) трех составов, получаемых на основе модифицированной эпоксидной смолы Этал-247, отверждаемой отвердителями марок Этал-45М, Этал-1472 и Этал-45TZ₂. Все компоненты полимерных смесей производства АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ».

Для исследования воздействия климатических факторов на изменение динамической усталостной прочности полимерных материалов производилось их натурное экспонирование на испытательной площадке научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий

и экспертиз НИ МГУ им. Н.П. Огарёва. Контроль и фиксация количественных значений факторов окружающей среды проводились с помощью автоматической станции контроля загрязнения атмосферного воздуха с актинометрическим комплексом в составе. Схема эксперимента представлена на рисунке 1. Съём образцов с испытательных стендов проводился с учетом контрольных точек, соответствующих достижению следующих уровней накопленных значений суммарной солнечной радиации – 400, 800, 1600 и 3200 МДж/м² (уровень в 3200 МДж/м² соответствует приблизительно одному календарному году натурального экспонирования во временном эквиваленте).

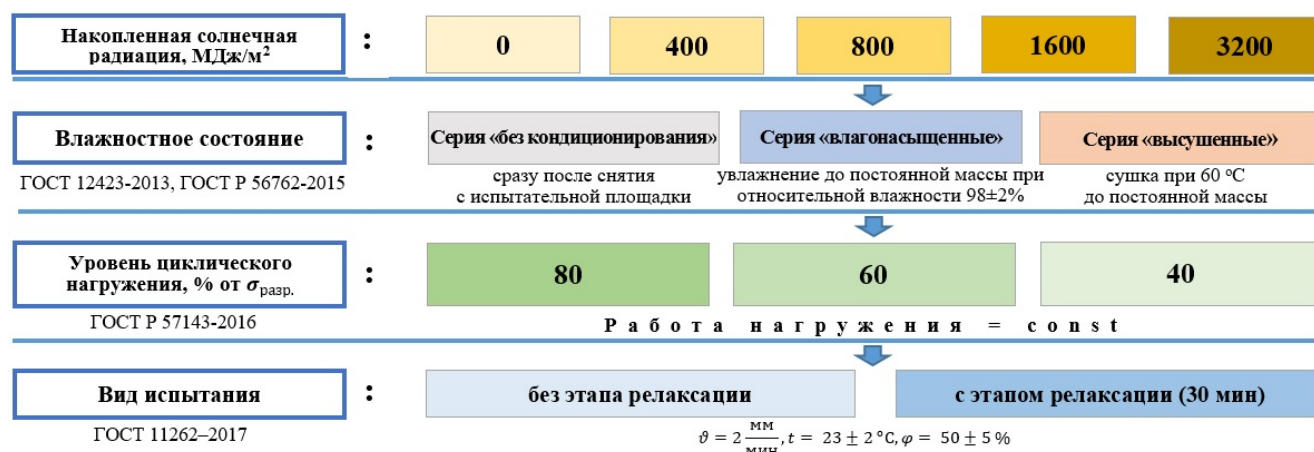


Рисунок 1 – Схема экспериментального исследования

Для определения физико-механических характеристик полимерных материалов использовались образцы-восьмерки (тип 2 по ГОСТ 11262-2017). Испытание образцов на растяжение осуществлялось с помощью разрывной машины SHIMADZU серии AGS–X с программным обеспечением TRAPEZIUM X. Циклические испытания образцов проводились в соответствии с ГОСТ Р 57143-2016 при мягком циклическом амплитудном нагружении на уровнях 40, 60 и 80% от разрушающих напряжений. Число циклов рассчитывалось, исходя из уровня суммарной работы нагружения, эквивалентной 5 циклам нагружения при 80% напряжения.

Исследование закономерностей накопления повреждений в полимерных материалах методом акустической эмиссии (АЭ) осуществлялось на оборудовании Центра экспериментальной механики Пермского политехнического университета (система регистрации сигналов АЭ AMSY-6). Для изучения процессов накопления повреждений использовался широкополосный датчик АЭ AE105A (частотный диапазон 450-1150 кГц) и предусилитель (40 дБ). Для записи волновых форм применялся цифровой фильтр в расширенном диапазоне частот 25-850 кГц. Калибровка датчиков АЭ осуществлялась с использованием источника Су-Нильсена.

В третьей главе представлены результаты анализа кинетики накопления повреждений (метод АЭ) в структуре полимерных материалов под действием механических нагрузок. Рассчитана кинетика накопления сигналов АЭ (кумулятивная энергия), определены функции распределения значений энергии сигналов АЭ в процессе нагружения. Проведен анализ распределения частот спектрального максимума, рассчитанных с помощью быстрого преобразования Фурье с применением оконной функции Хэмминга с целью подавления краевых эффектов на границах

частотного диапазона. Установлены диапазоны наиболее частого фиксирования значений ЧСМ: 1 – 20÷60; 2 – 260÷300; 3 – 680÷760 кГц (рисунок 2). Выдвинута гипотеза, что высокие значения частоты спектрального максимума соответствуют разрыву цепи макромолекулы, низкие – разрушению поперечных связей, а промежуточные связаны с трением и межмолекулярным взаимодействием макромолекул.

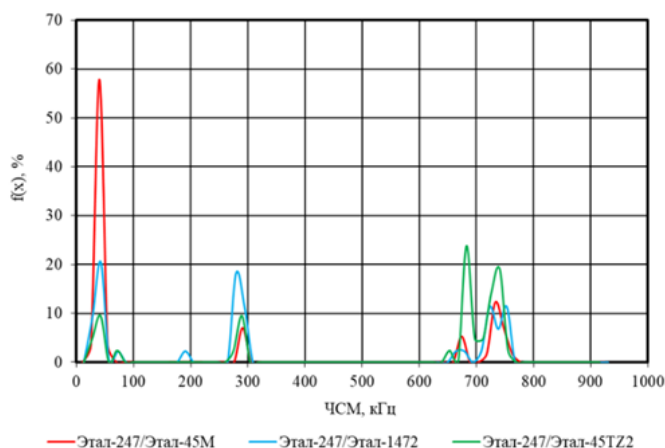


Рисунок 2 – Кривые распределения частот спектрального максимума в процессе нагружения ЭП растягивающими нагрузками

Разработана методика оценки накопления повреждений при циклическом нагружении образцов полимерных материалов. Для расчета относительного накопленного числа отказов (%) отдельно для каждого цикла ω_i , этапа разрушения $\omega_{\text{разр.}}$, а также суммарного числа отказов ω предложены формулы:

$$\omega_i = \frac{N_{\text{def.}i}}{N_0} \cdot 100, \quad (1)$$

$$\omega_{\text{разр.}} = \frac{N_{\text{def.разр.}}}{N_0} \cdot 100, \quad (2)$$

$$\omega = \sum_{i=1}^m \omega_i + \omega_{\text{разр.}}, \quad (3)$$

где N_0 – число работоспособных элементов структуры до приложения механических нагрузок; $N_{\text{def.}i}$ – число структурных элементов, вышедших из работоспособного состояния (отказов) в ходе циклического воздействия; $N_{\text{def.разр.}}$ – число отказов на этапе разрушения; $i = 1 \div m$ – номер цикла нагружения.

Число накопленных отказов на этапе разрушения без учета предыстории нагружения $\omega'_{\text{разр.}}$ предложено определять по формуле:

$$\omega'_{\text{разр.}} = \frac{N_{\text{def.разр.}}}{N_{\text{def.разр.}} + N_{\text{разр.}}} \cdot 100. \quad (4)$$

где $N_{\text{разр.}}$ – число актов этапа разрушения, для которых не наблюдалось возникновения отказов.

Расчет удельных показателей накопленных отказов для всех этапов механического воздействия θ и для этапа разрушения $\theta_{\text{разр.}}$ осуществлялся по формулам:

$$\theta = \frac{\omega}{\sigma_{\text{раст.}}}, \quad (5)$$

$$\theta_{\text{разр.}} = \frac{\omega'_{\text{разр.}}}{\sigma_{\text{раст.}}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{раст.}}$ – максимальное напряжение на этапе разрушения.

Типичная кривая деформирования образца состава Этал-247/Этал-45М (контроль, серия «без кондиционирования») при циклическом нагружении (10 МПа, 25 циклов) представлена на рисунке 3; кривые накопления повреждений в зависимости от относительного удлинения и напряжения при растяжении – на рисунке 4. Предложенный подход к расчету поэтапного накопления повреждений в процессе

циклического воздействия позволяет проследить кинетику накопления отказов в зависимости от уровня прикладываемых напряжений и относительных деформаций.

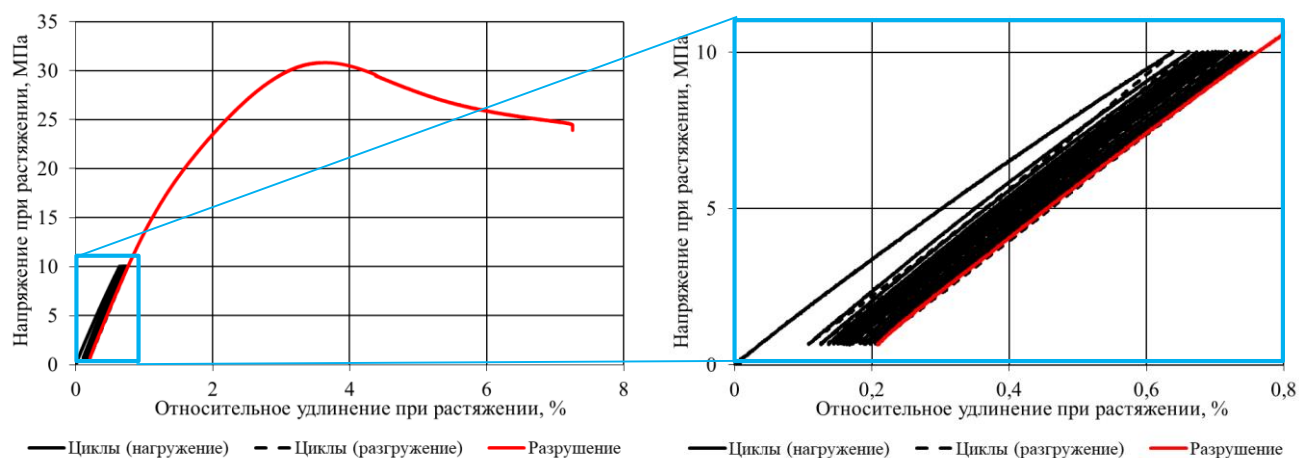


Рисунок 3 – Кривая деформирования полимера Этал-247/Этал-45М (серия «без кондиционирования») при циклическом нагружении (10 МПа, 25 циклов)

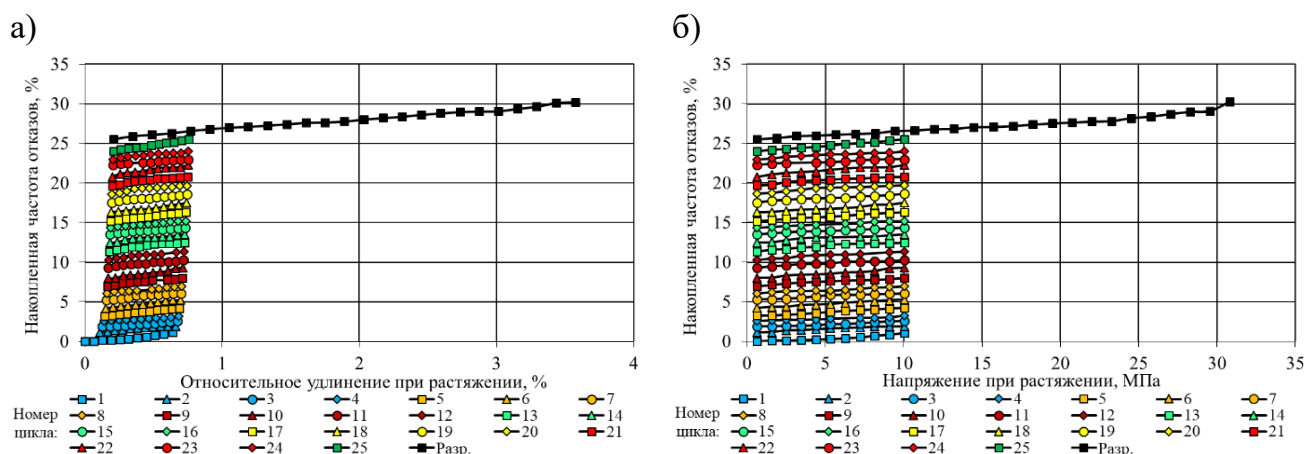


Рисунок 4 – Кривые накопления повреждений в структуре полимера Этал-247/Этал-45М (серия «без кондиционирования», 10 МПа, 25 циклов) в зависимости от относительного удлинения (а) и напряжения (б) при растяжении

В четвертой главе представлены результаты исследования свойств ЭП под действием циклического нагружения с учетом натурального климатического воздействия и влажностного состояния образцов. Установлено, что влагосодержание оказывает влияние на упруго-прочностные характеристики полимерных материалов, кинетику накопления повреждений, а также удельный показатель $\theta_{\text{разр.}}$. Выявлено (рисунок 5), что для всех исследуемых составов в контрольном состоянии удаление свободной влаги приводит к увеличению предела прочности (а), относительного удлинения (б) и модуля упругости при растяжении, а также прочности при разрыве (в), что указывает на обратимое влияние влаги. Увеличение влагосодержания также сопровождается повышением относительного удлинения при разрыве (г), что наиболее ярко проявляется для состава Этал-247/Этал-45TZ₂ и свидетельствует о смене характера деформирования данного полимера при повышении уровня влагосодержания некоторого критического уровня.

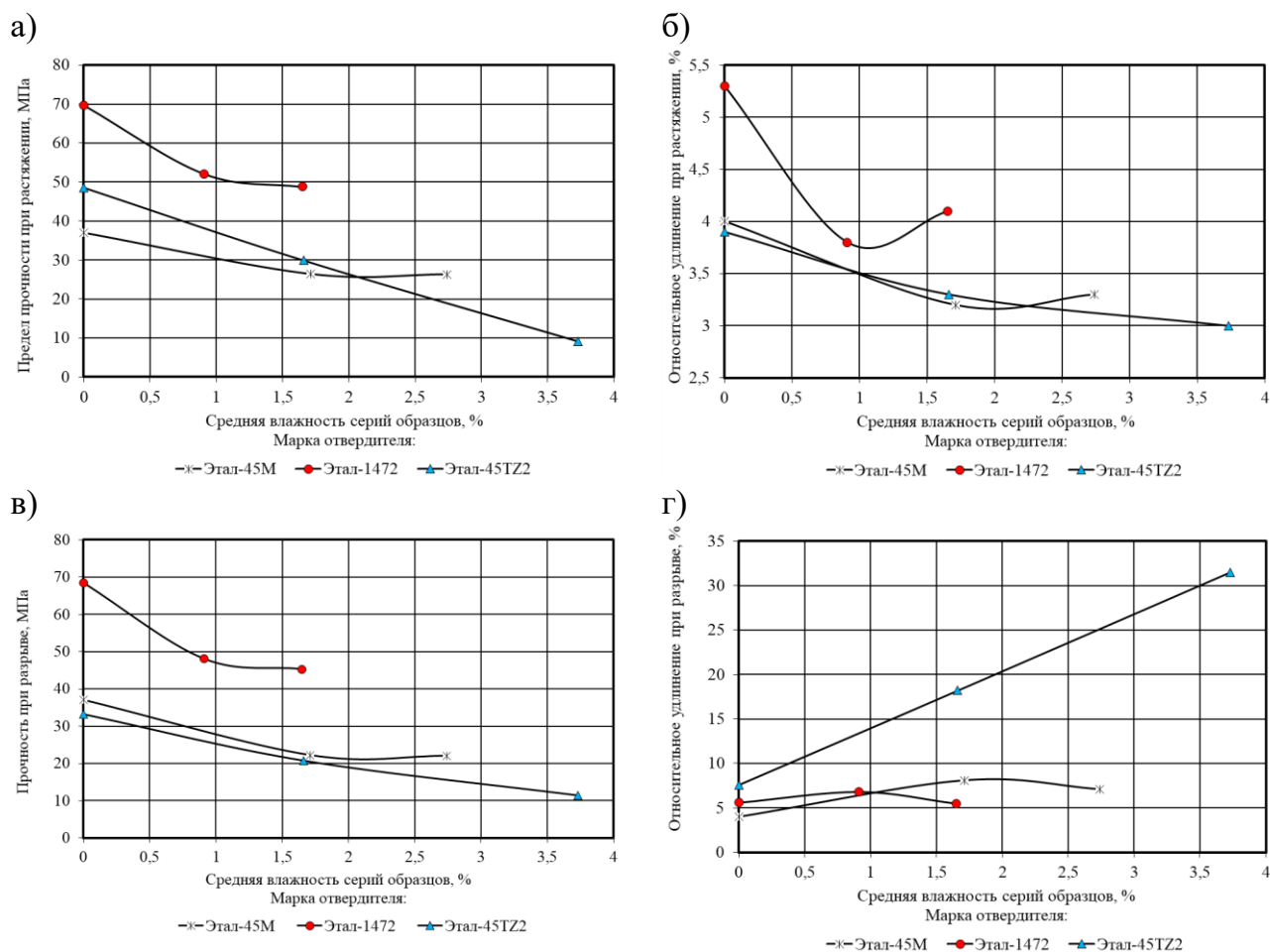


Рисунок 5 – Изменение средних значений предела прочности (а) и относительного удлинения (б) при растяжении, прочности (в) и относительного удлинения (г) при разрыве полимеров на основе эпоксидной смолы Этал-247 и отвердителей Этал-45М, Этал-1472, Этал-45TZ₂, в зависимости от средней влажности серий образцов

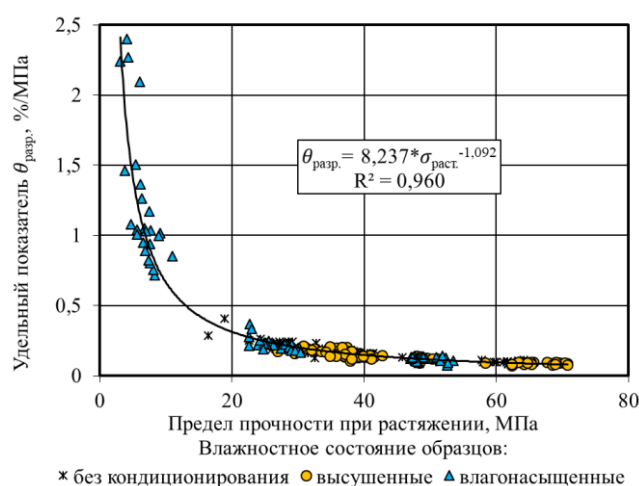


Рисунок 6 – Обобщенная (по трем составам) корреляционная зависимость между удельным показателем $\theta_{\text{разр.}}$ и пределом прочности ЭП при растяжении

Выявлена корреляционная зависимость между удельным показателем $\theta_{\text{разр.}}$ и пределом прочности ЭП при растяжении, с высокой степенью достоверности описываемая одной степенной функцией для всех исследуемых составов ЭП (рисунок 6), в том числе для различных влажностных состояний и длительности климатического воздействия. Это свидетельствует о возможности использования данного критерия для оценки степени повреждаемости полимерных материалов.

Определено влияние влагосодержания на изменение свойств ЭП, в том числе в предельных состояниях. В ряде случаев сорбированная влага может выступать в качестве механизма, частично компенсирующего необратимые изменения свойств ЭП. Подтверждена необходимость

оценки упруго-прочностных показателей ЭП, подвергаемых воздействию натурального климатического старения, не только в равновесно-влажностном (серия «без кондиционирования»), но и в предельных состояниях (серии «высушенные» и «влажносодержащие»).

Изучено влияние различных уровней циклического нагружения, числа циклов, интенсивности накопленной солнечной радиации и влагосодержания исследуемых полимерных материалов на изменение их упруго-прочностных характеристик. Установлено, что с увеличением числа циклов наблюдается снижение значений

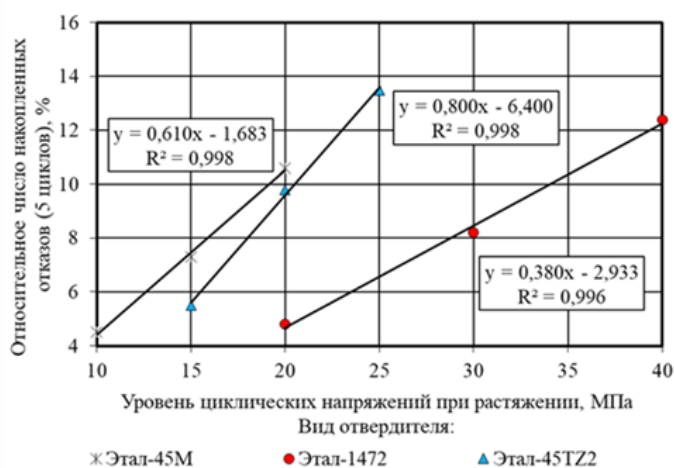


Рисунок 7 – Относительное число накопленных отказов (5 циклов) в зависимости от уровня циклического нагружения (серия «без кондиционирования»)

гистерезисных потерь для всех исследуемых составов. Выявлена линейная зависимость (рисунок 7) относительного числа накопленных отказов от уровня циклических напряжений для трех исследуемых составов ЭП (серия «без кондиционирования»). Установлено, что наименьший угол наклона линейных зависимостей от уровня прикладываемого циклического нагружения наблюдается для состава, отверждаемого Этал-1472, наибольший – для Этал-45TZ₂, что свидетельствует о более высокой способности ЭП Этал-247/Этал-1472 сопротивляться действию циклических нагрузок.

В пятой главе приведены результаты исследования релаксационных процессов, протекающих в структуре полимерных материалов. Выявлено изменение релаксирующего модуля, суммарного относительного удлинения и остаточной деформации в зависимости от уровня прикладываемой нагрузки, влажностного состояния и накопленной суммарной солнечной радиации. Установлено, что наибольшей релаксационной устойчивостью обладает ЭП Этал-247/Этал-1472, наименьшей – Этал-247/Этал-45TZ₂.

Проведена аппроксимация кривых релаксации ЭП с помощью уравнения Кольрауша:

$$\sigma = \sigma_0 \times e^{-(t/\tau)^\theta}, \quad (7)$$

где σ_0 – напряжение в момент начала разгрузки, МПа; σ – напряжение в момент времени t , МПа; τ – время релаксации Кольрауша, мин.; θ – коэффициент; и уравнения Больцмана-Вольтерры с ядрами $T_1(t)$ и $T_2(t)$:

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 - \int_0^t T(\tau) d\tau \right], \quad (8)$$

позволяющими определить механизмы, регулирующие изменение энтропии в ходе релаксационного процесса, в соответствии с методикой, предложенной в Инсти-

туте элементоорганических соединений РАН. Определены числовые значения показателей уравнений Кольрауша (коэффициент θ , время релаксации τ , напряжение σ_τ) и Больцмана-Вольтерры (параметры k^* , n , A_1^* , σ_∞ для ядра $T_1(t)$ и γ , a , A_2^* , σ_∞ для ядра $T_2(t)$) в зависимости от уровня релаксирующего напряжения, влагосодержания и уровня накопленной суммарной солнечной радиации. Установлено, что при использовании ядра $T_1(t)$ уравнения Больцмана-Вольтерры достоверность аппроксимации ($R^2=0,990\div 0,999$) выше, чем при использовании ядра $T_2(t)$ для всех исследуемых составов ($R^2=0,906\div 0,999$). Следовательно, лимитирующей стадией процесса релаксации напряжения для всех исследованных ЭП является взаимодействие релаксаторов и переход их в нерелаксирующий материал, а не скорость диффузии кинетических единиц.

Определены коэффициенты полиномиальных уравнений, описывающих изменение параметров уравнений Кольрауша (7) и Больцмана-Вольтерры (8) в зависимости от влагосодержания, интенсивности климатического воздействия и уровня релаксирующего напряжения. Выявлено, что наибольший вклад в изменение параметра θ уравнения Кольрауша оказывает влагосодержание образцов и уровень релаксирующего напряжения.

В шестой главе представлены результаты оценки комплексного влияния циклического механического нагружения, влажностного состояния образцов и уровня накопленной суммарной солнечной радиации на изменение удельных показателей θ и $\theta_{\text{разр.}}$. Установлено, что ЭП Этал-247/Этал-1472 и Этал-247/Этал-45М обладают большей усталостной прочностью, а также стойкостью к действию климатических факторов по сравнению с полимером Этал-247/Этал-45TZ₂.

На основе метода главных компонент разработаны многомерные математические модели процессов старения ЭП, позволяющие с высокой степенью достоверности прогнозировать изменение их свойств в зависимости от уровня циклического нагружения (X_1), числа циклов (X_2), влагосодержания (X_3) и накопленного уровня солнечной радиации (X_4). В качестве исследуемых характеристик оценивались: Y_1 – предел прочности при растяжении, МПа; Y_2 – прочность при разрыве, МПа; Y_3 – относительное удлинение при растяжении, %; Y_4 – относительное удлинение при разрыве, %; Y_5 – модуль упругости, МПа; Y_6 – накопленное число повреждений (этап разрушения), %; Y_7 – накопленное число повреждений (циклы), %; Y_8 –

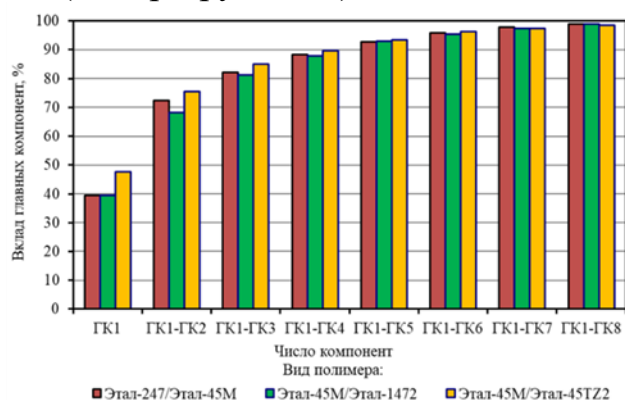


Рисунок 8 – График суммарных вкладов главных компонент для исследуемых составов ЭП

суммарное накопленное число повреждений, %; Y_9 – удельный показатель (этап разрушения), %/МПа; Y_{10} – суммарный удельный показатель, %/МПа.

При прогнозировании эксплуатационных показателей использовался метод проекции на латентные структуры. Из анализа графика суммарных вкладов главных компонент установлено (рисунок 8), что ГК1 в зависимости от состава описывает от 39,5 до 47,6% данных; ГК2 – от 27,9 до 32,8%. Пять первых компо-

нент описывают не менее 92% данных, что является хорошим результатом при подобном моделировании. Сопоставление фактических и предсказанных нормированных значений при использовании двух наборов главных компонент (ГК1-ГК2 и ГК1-ГК5) показало (рисунок 9), что коэффициент достоверности аппроксимации для всех исследуемых показателей ЭП принимает высокие значения ($R^2 \geq 0,91$) для пяти первых главных компонент. Использование при прогнозировании свойств двух первых компонент позволяет получить достоверные прогнозы для предела прочности при растяжении (а), модуля упругости, а также удельных показателей $\theta_{\text{разр.}}$ (в) и θ (г).

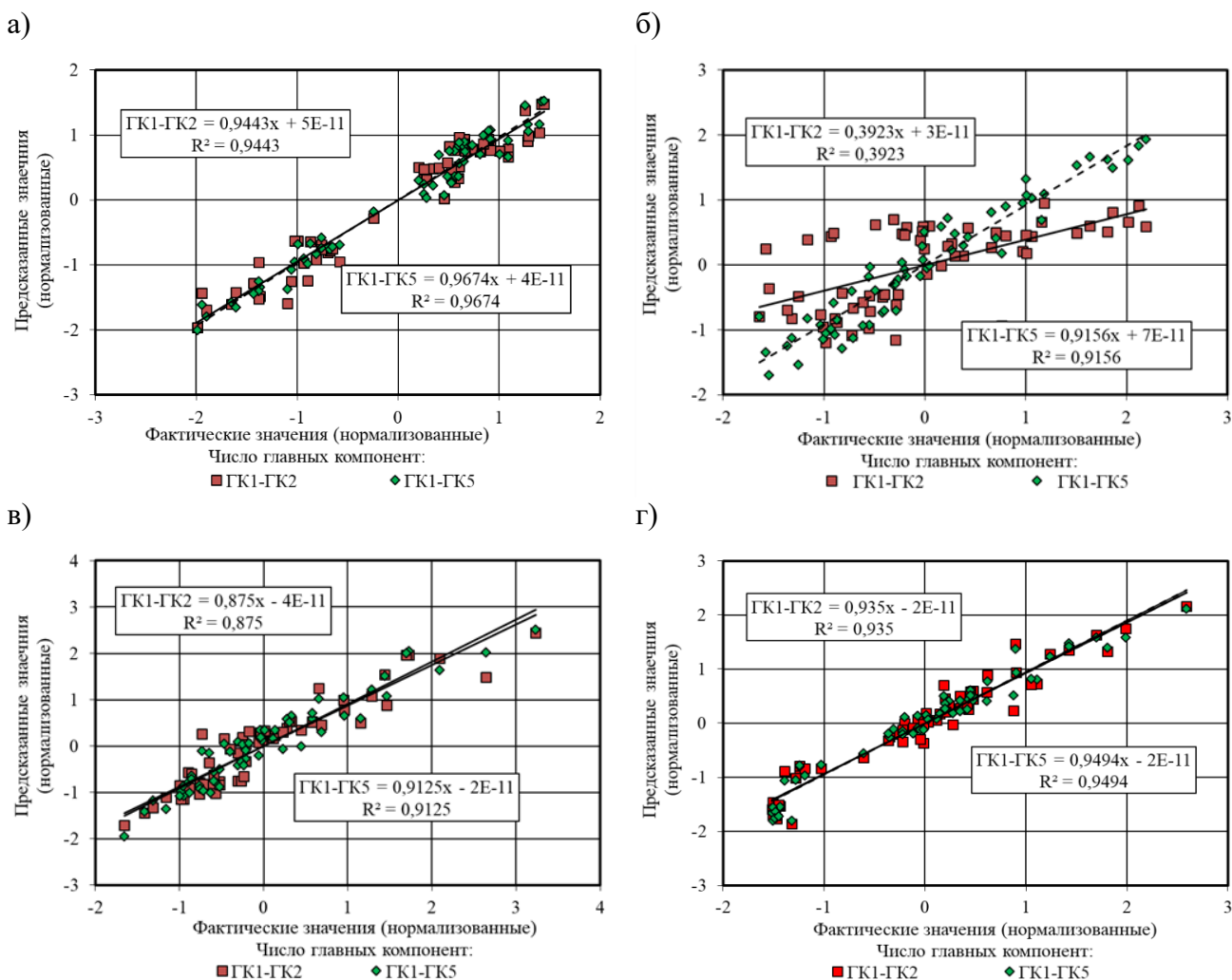


Рисунок 9 – Корреляционные зависимости между фактическими и предсказанными нормированными значениями исследуемых характеристик полимера Этал-247/Этал-45М (а – предел прочности при растяжении; б – относительное удлинение при растяжении; в – удельный показатель $\theta_{\text{разр.}}$; г – суммарный удельный показатель θ)

Высокое качество прогноза при ГК1-ГК2, выявленное для удельных показателей $\theta_{\text{разр.}}$ и θ , подтверждает ранее сделанные выводы о возможности их использования как критериев качества полимерных материалов, в том числе эксплуатирующихся в условиях циклических механических нагрузжений и факторов окружающей среды. Разработанная методика оценки кинетики накопления повреждений ПМ принята к использованию ООО «Центр Полимерных Композитов».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Разработана методика оценки накопления повреждений при циклическом нагружении образцов полимерных материалов, основанная на использовании методов фрактального анализа временных рядов. Выявлен комплекс показателей повреждаемости, расчет которых необходимо проводить в процессе исследований: кинетика накопления повреждений в зависимости от уровня растягивающих напряжений и относительного удлинения; суммарное число отказов при циклическом нагружении и на этапе разрушения; удельные показатели на этапе разрушения и всей истории нагружения.

2. На основе анализа распределения частот спектрального максимума, рассчитанных с помощью быстрого преобразования Фурье с применением оконной функции Хэмминга (метод акустической эмиссии) установлено формирование ярко выраженных диапазонов наиболее частого фиксирования значений ЧСМ: 1 – $20 \div 60$; 2 – $260 \div 300$; 3 – $680 \div 760$ кГц. Выдвинута гипотеза, что высокие значения частоты спектрального максимума характеризуют разрыв цепи макромолекулы, низкие значения соответствуют разрушению связей между цепями, а промежуточные связаны с трением и межмолекулярным взаимодействием макромолекул. Проведен анализ вклада вышеуказанных диапазонов в механизм разрушения исследуемых эпоксидных полимеров.

3. На основе экспериментальных исследований выявлено комплексное влияние влагосодержания серий образцов, в том числе в граничных состояниях, и накопленной в процессе натурного климатического старения суммарной солнечной радиации на изменение свойств эпоксидных полимеров исследуемых составов. Разработаны математические зависимости, описывающие изменение относительного удлинения, предела прочности и модуля упругости при растяжении, а также удельного показателя $\theta_{\text{разр.}}$, как критерия поврежденности материала, в зависимости от влагосодержания полимеров и уровня накопленной солнечной радиации.

4. Определены коэффициенты полиномиальных уравнений, описывающих изменение равновесного напряжения σ_{∞} ядер релаксации $T_1(t)$ и $T_2(t)$ уравнения Больцмана-Вольтерры эпоксидных полимеров в зависимости от уровня напряжений, влагосодержания серий образцов и уровня накопленной солнечной радиации. Выявлены различия в изменении характера распределения равновесного напряжения σ_{∞} в зависимости от влагосодержания серий образцов и суммарной солнечной радиации при повышении уровня релаксационного напряжения.

5. Установлено, что при использовании ядра $T_1(t)$ уравнения Больцмана-Вольтерры достоверность аппроксимации ($R^2=0,990 \div 0,999$) выше, чем при использовании ядра $T_2(t)$ для всех исследуемых составов ($R^2=0,906 \div 0,999$). Следовательно, лимитирующей стадией процесса релаксации напряжения для всех исследованных эпоксидных полимеров является полное взаимодействие релаксаторов и переход их в нерелаксирующий материал.

6. Выявлено, что полимеры на основе модифицированной эпоксидной смолы Этал-247, отверждаемой отвердителями Этал-1472 и Этал-45М, обладают высокой усталостной прочностью к действию циклического нагружения различного уровня

и повышенной стойкостью к действию климатических факторов по сравнению с полимером Этал-247/Этал-45TZ₂.

7. Установлено, что для количественной оценки процесса накопления частоты отказов в структуре полимерных образцов, подвергаемых воздействию циклических нагрузок различной интенсивности, а также последующего нагружения до разрушения целесообразным является использование комплексного критерия – удельного показателя накопленных повреждений $\theta_{\text{разр.}}$, позволяющего дать количественную оценку состояния образца после всей истории нагружения.

8. Разработаны математические модели, позволяющие с высокой степенью достоверности прогнозировать изменение свойств эпоксидных полимеров в зависимости от уровня циклического нагружения при растяжении, числа циклов, концентрации влаги в структуре полимеров и накопленного уровня солнечной радиации, используемого в качестве основной количественной оценки интенсивности натурального климатического воздействия. Выявлена перспективность использования метода главных компонент при исследовании процессов старения полимерных материалов, в том числе в условиях воздействия натуральных климатических факторов.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении адаптации разработанного подхода к оценке комплексного влияния циклических нагружений различного уровня, количественных факторов окружающей среды, в том числе с учетом варьирования влагосодержания исследуемых составов в процессе натурального экспонирования, на других видах полимерных материалов, в том числе наполненных, с целью выявления дополнительных критериев качества и разработки методов количественного прогнозирования их долговечности.

Основные результаты диссертационного исследования изложены в следующих публикациях автора:

в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Низина, Т.А. Количественный анализ кинетики накопления повреждений в структуре полимерных материалов при растяжении / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, **Н.С. Канаева** // Строительство и реконструкция. 2020. №2 (88). С. 77-89.

2. Селяев, В.П. Количественная оценка кинетики накопления повреждений в структуре полимерной матрицы под действием натуральных климатических факторов и растягивающих нагрузок / В.П. Селяев, Д.Р. Низин, **Н.С. Канаева** // Научный журнал строительства и архитектуры. 2021. 4(64). С. 93-102.

3. Низина, Т.А. Влияние влажностного состояния на кинетику накопления повреждений в структуре образцов эпоксидных полимеров под действием растягивающих напряжений / Т.А. Низина, Д.Р. Низин, **Н.С. Канаева**, Д.А. Климентьева, А.А. Порватова // Эксперт: теория и практика. 2022. №1. С. 37-45.

4. **Канаева, Н.С.** Релаксационные свойства полимерных материалов на основе эпоксидных связующих / **Н.С. Канаева**, Д.Р. Низин, Т.А. Низина // Эксперт: теория и практика. 2022. №3 (18). С. 42-46.

5. Низина, Т.А. Моделирование влияния длительности натурального экспонирования и интенсивности актинометрических параметров на изменение физико-механических показателей эпоксидных полимеров с учетом их влагосодержания / Т.А. Низина, Д.Р. Низин, В.П. Селяев,

Н.С. Канаева // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2022. Том XII. №5. С. 19-26.

в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Web of Science и Scopus:

6. Nizina, T.A. Applying the Fractal Analysis Methods for the Study of the Mechanisms of Deformation and Destruction of Polymeric Material Samples Affected by Tensile Stresses / T.A. Nizina, D.R. Nizin, **N.S. Kanaeva**, N.M. Kuznetsov, D.A. Artamonov // Key engineering materials. Switzerland. 2019. №799. P. 217-223.

7. Nizina, T.A. Statistical Analysis of the Frequency of Damage Accumulation in the Structure of Epoxy Composites Under Tensile Loads / T.A. Nizina, D.R. Nizin, **N.S. Kanaeva** // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 1-8.

8. Nizin, D. R. The Effect of Natural Climatic Aging on Damage Accumulation Kinetics in the Structure of Epoxy Polymers Under Tensile Loads / D. R. Nizin, T. A. Nizina, **N. S. Kanaeva**, A. I. Gorenkova // Lecture Notes in Civil Engineering. Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction. 2021. Vol.147. No. 8. Pp. 147-153.

9. Nizina, T.A. Method for analyzing the kinetics of damage accumulation in the structure of polymer materials under tensile stresses / T.A. Nizina, D.R. Nizin, **N.S. Kanaeva**, D.A. Artamonov // AIP Conference Proceedings. 2021. V. 2371. Pp. 1-6.

10. Nizina, T.A. The Effect of Moisture State on Kinetics of Damage Accumulation in the Structure of Epoxy Polymer Samples Under Tensile Stresses / T.A. Nizina, **N.S. Kanaeva**, D.R. Nizin // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. V. 151. Pp. 208-214.

11. Selyaev, V.P. Quantitative assessment of the kinetics of damage accumulation in the polymer matrix structure under full-scale climatic factors and tensile load / V.P. Selyaev, D.R. Nizin, **N.S. Kanaeva** // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. 4 (52). Pp. 63-71.

12. Selyaev, V.P. Analysis of the moisture content effect on the specific index and damage accumulation kinetics in the structure of polymeric materials during natural climatic aging / V.P. Selyaev, T.A. Nizina, D.R. Nizin, **N.S. Kanaeva** // International Journal for Computation Civil and Structural Engineering. 2022. 18(1). С. 99-108.

13. Nizina, T.A. Effect of Cyclic Loading Level on Elastic-Strength Characteristics and Kinetics of Damage Accumulation in Polymers / T.A. Nizina, D.R. Nizin, **N.S. Kanaeva** // Innovations and Technologies in Construction. BUILDINTECH BIT 2022. Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Vol 307. Pp. 49-55.

14. Nizin, D.R. Kinetics of failure accumulation in polymers under the cyclic loads / D.R. Nizin, T.A. Nizina, **N.S. Kanaeva** // AIP Conference Proceedings 4 May 2023; 2497 (1): 040017.

в других изданиях:

15. Селяев, В.П. Фрактальные методы анализа структуры и свойств композиционных строительных материалов / В.П. Селяев, **Н.С. Канаева**, Т.А. Низина, Ю.А. Ланкина, Е.С. Буянова // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всероссийской научно-технической конференции. Отв. ред. Т.А. Низина. 2018. С. 158-163.

16. Nizina, T.A. Application of fractal analysis methods in the study of deformation mechanisms and composite building materials fracture / T.A. Nizina, V.P. Selyaev, D.R. Nizin, A.S. Balykov, D.I. Korovkin, **N.S. Kanaeva** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. UK. 2018. №456. P. 1-6.

17. Низина, Т.А. Фрактальный анализ кривых деформирования эпоксидных полимеров при растяжении / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, Д.А. Артамонов, **Н.С. Канаева** // Полимеры в строительстве: научный Интернет-журнал. 2019. №1 (7). С. 48-57.

18. Nizina, T.A. Fractal analysis of tensile deformation curves of epoxy polymers based on modified epoxy binders / T.A. Nizina, D.R. Nizin, D.A. Artamonov, **N.S. Kanaeva** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 972. 012048.

19. Низина, Т.А. Анализ климатической стойкости модифицированных эпоксидных полимеров в условиях умеренно-континентального климата / Т.А. Низина, Д.Р. Низин, Д.А. Артамонов, **Н.С. Канаева**, Ю.А. Ланкина // Эксперт: теория и практика. 2020. №1(4). С. 33-42.

20. Низина, Т.А. Фрактальный анализ процесса деформирования эпоксидных полимеров под действием растягивающих напряжений / Т.А. Низина, Д.Р. Низин, **Н.С. Канаева**, Д.А. Климентьева // Эксперт: теория и практика. 2020. №3 (6). С. 42-49.

21. Низина, Т.А. Анализ процесса разрушения эпоксидных полимеров под действием климатических факторов / Т.А. Низина, Д.Р. Низин, **Н.С. Канаева**, Д.А. Артамонов, Д.А. Климентьева // Климат–2020: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и Сложные технические системы: материалы V Всероссийской научно-технической конференции. ФГУП «ВИАМ». М.: ВИАМ. 2020. С. 37-49.

22. Низина, Т.А. Анализ кинетики накопления повреждений в структуре эпоксидных полимеров, экспонированных в условиях умеренно-континентального климата / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, **Н.С. Канаева**, Д.А. Артамонов // Умные композиты в строительстве: научно-технический журнал. 2020. Т. 1. В. 1. С. 27-35.

23. Низина, Т.А. Количественная оценка кинетики накопления повреждений в полимерных материалах, экспонированных в натуральных климатических условиях / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, **Н.С. Канаева**, Д.А. Артамонов // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020. 2021. Т. 2. С. 193-199.

24. Низина, Т.А. Влияние влагосодержания и климатического старения на кинетику накопления повреждений в структуре полимерных композитов под действием растягивающих нагрузок / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, **Н.С. Канаева**, А.Н. Чернов // Климат-2021: Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы. Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции. 2021. С. 53-67.

25. Низин, Д.Р. Изменение влагосодержания образцов эпоксидных полимеров в условиях натурального климатического старения / Д.Р. Низин, Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.А. Климентьева, **Н.С. Канаева** // Климат-2021: Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы. Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции. 2021. С. 41-52.

26. Низин, Д.Р. Обратимое и необратимое изменение свойств полимерных материалов в процессе натурального климатического старения / Д.Р. Низин, Т.А. Низина, В.П. Селяев, **Н.С. Канаева** // Умные композиты в строительстве. 2022. Т. 3. № 1. С. 18-29.

27. Низина, Т.А. Влияние влагосодержания на кинетику накопления повреждений в структуре полимерных композитов в процессе натурального климатического старения / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, **Н.С. Канаева**, А.Н. Чернов // Вестник Приволжского территориального отделения РААСН. Вып. 25. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2022. С. 148-155.

Программные комплексы:

1. Низин Д.Р., Низина Т.А., **Канаева Н.С.** Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022612647 «Расчет локальных и интегрального индексов фрактальности кривых деформирования образцов полимерных материалов» от 28.02.2022 (заявка №2022611934 от 15.02.2022 г.).

2. Низин Д.Р., Низина Т.А., **Канаева Н.С.** Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022666240 «Расчет параметров уравнений Больцмана-Вольтерры для описания процессов релаксации полимерных материалов» от 26.08.2022 (заявка №2022664918 от 11.08.2022 г.).

Подписано в печать 20.10.2023. Объем 1,0 п. л.

Тираж 100 экз. Заказ №753

Издательство Мордовского университета

430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Советская, 24