

На правах рукописи



Нагайцева Наталья Валерьевна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗКОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ
СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2014

Работа выполнена в Новокузнецком институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кемеровский государственный университет»

Научный руководитель **Каледин Валерий Олегович** – доктор технических наук, профессор, Новокузнецкий институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Кемеровский государственный университет»

Официальные оппоненты **Кургузов Владимир Дмитриевич** – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения РАН», ведущий научный сотрудник лаборатории механики разрушения
Рояк Михаил Эммануилович – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры прикладной математики

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН»

Защита состоится 05 марта 2014 г. в 12.30 на заседании диссертационного совета Д212.252.02 в ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, Россия, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42, факс (3843) 46-57-92, E-mail: sibsiu_ais@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет».

Автореферат разослан 24 января 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В.Ф. Евтушенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При производстве изделий из полимерных композиционных материалов актуальна проблема выходного контроля прочности изделия, которая менее стабильна, чем у традиционных однородных материалов. Существующие в настоящее время методы неразрушающего контроля не позволяют произвести достоверную оценку влияния выявленных дефектов сплошности на разрушающую нагрузку.

Представляются перспективными методы оценки прочности изделий из композиционных материалов, основанные на оценке интенсивности накопления микроструктурных повреждений материала при неразрушающем механическом нагружении. Непосредственно в эксперименте могут быть измерены температурные поля, вызванные нагревом материала при микроразрушении, а по этим данным возможно установить зоны образования таких дефектов, не доводя изделия до разрушения. Это требует совместного применения экспериментальных методов для измерения наблюдаемых параметров состояния конструкции при испытании и методов математического моделирования для количественной интерпретации результатов измерений.

Однако в настоящее время диагностика состояния изделий из композиционных материалов по измеряемым параметрам температурных полей представляет собой не решенную задачу. Необходимо построить и обосновать математическую модель, описывающую тепловые эффекты при накоплении микрповреждений материала в процессе испытаний, разработать алгоритмы идентификации модели и алгоритмы количественной интерпретации данных экспериментальных измерений, а также программное обеспечение для проведения указанных расчётов.

Целью работы является разработка программно-методического обеспечения для математического моделирования связанных процессов накопления микрповреждений и выделения тепла при необратимой деформации композиционного материала.

Для достижения цели в работе поставлены и решены задачи:

1. Построение математической модели изменения механических и термодинамических переменных состояния полимерного композиционного материала при статическом нагружении.

2. Разработка численной схемы, методики и программного обеспечения для расчета температурных полей при статическом нагружении пластин с концентраторами напряжений.

3. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для идентификации параметров модели по данным испытаний образцов на одноосное растяжение с постоянной скоростью деформации.

4. Апробация разработанной модели, алгоритмов и компьютерных программ на данных натурного эксперимента по измерению температурных полей в образцах из органопластика.

Методы исследования основаны на использовании известных положений механики композиционных материалов; методов решения краевых задач математической физики; численных методов решения краевых задач и вычислительной математики; методов алгоритмизации и объектно-ориентированного программирования.

Научную новизну работы определяют:

1. Модель квазистатического деформирования композиционного материала, характеризующаяся учетом физической нелинейности и необратимости деформирования, отличающаяся тем, что часть необратимо рассеянной работы затрачивается на накопление микроструктурных дефектов, а часть – на увеличение энтальпии материала.

2. Аппроксимация диаграммы деформирования материала в виде гладкого решения дифференциального уравнения, содержащая шесть настроечных параметров, позволяющая описать нелинейный участок, перегиб и линейный участок диаграммы деформирования композиционных материалов.

3. Алгоритм и методика идентификации модели по данным испытаний стандартных образцов на разрывной машине с измерением поля температур термографическим комплексом.

4. Конечно-элементная схема решения начально-краевой задачи для расчета поля температуры в условиях внешнего конвективного и внутреннего кондуктивного теплообмена при квазистатическом деформировании с накоплением микроповреждений.

5. Автоматная модель программной реализации алгоритмов вычислительной механики на основе функционально-объектной парадигмы.

6. Компьютерные программы для идентификации модели термомеханического поведения материала и для расчета температурных полей в изделиях из полимерных композиционных материалов.

7. Результаты расчетно-теоретической интерпретации данных экспериментального исследования, подтверждающие обнаружение зон концентрации микроповреждений путем обработки данных измерения температуры при статических испытаниях пластин из композиционных материалов.

Личный вклад автора заключается в построении математической модели термомеханического поведения композиционного материала при необратимой деформации с учетом микроструктурных повреждений, разработке численной схемы решения начально-краевой задачи и обосновании её сходимости, конкретизации алгоритмов решения, проведении расчетов и анализе результатов вычислительного эксперимента, а также в участии в коллективной разработке комплекса программ решения задач вычислительной механики и разработке программного обеспечения для идентификации модели материала.

Практическая значимость работы. Результаты диссертации могут быть использованы при разработке компьютерных программ для интерпрета-

ции результатов натурных статических испытаний; при выходном контроле качества изделий из композиционных материалов; при обучении студентов и повышении квалификации специалистов в области механики конструкций из композиционных материалов.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обеспечена корректным применением апробированных методов термомеханики сплошной среды и прикладной математики; исследованием сходимости и точности численного решения; согласованием результатов расчётов с известными экспериментальными данными.

Работа выполнялась в соответствии с планом НИР Новокузнецкого института (филиала) ФГБОУ ВПО «Кемеровский государственный университет» (НИР №12-05/3-13 и ОКР № 12-05/3-13).

Реализация результатов. Результаты работы (алгоритмы математического моделирования, программа для ЭВМ и результат численного моделирования) использованы в ОАО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» при разработке типовой методики № АЕВ 6-4878-ДМ «Диагностика технического состояния сложных пространственных конструкций из полимерных композиционных материалов на основе теплового контроля в процессе силового нагружения», что подтверждено справкой об использовании результатов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях «Инновации молодых» (Новокузнецк, 2011, 2012, 2013); XII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Новосибирск, 2011); XV Международной научной конференции, посвящённой памяти Генерального конструктора акад. М.Ф. Решетнева «Решетневские чтения» (Красноярск, 2011); VII (XXXIX) Международной научно-практической конференции (Кемерово, 2012); Международной научной и практической конференции «Science and Education» (Wiesbaden, 2012); Всероссийской научной конференции «Краевые задачи и математическое моделирование» (Новокузнецк, 2012); 2-ой Международной научной конференции «Applied and Fundamental Studies» (St. Louis, Missouri, USA, 2013); XXIII Всероссийской конференции «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности» (Новосибирск, 2013); 2-ой Международной конференции Academic science – problems and achievements (North Charleston, SC, USA 29406, 2013); Международной конференции «Научный потенциал мира» (г. София, Болгария, 2013).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 15 печатных работах, из них 2 – в рецензируемых изданиях из перечня ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 143 наименований. Диссертация изложена на 131 странице, включая 48 рисунков и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, излагается краткое содержание основных глав.

Первая глава содержит анализ постановок и методов математического моделирования тепловых процессов, сопровождающих накопление микроповреждений. Рассматриваются экспериментальные методы обнаружения повреждений в изделиях из композиционных материалов. Отмечается, что одной из проблем, связанных с исследованием механизма разрушения и оценки прочности композиционных материалов, является необходимость количественной оценки влияния концентрации напряжений на скорость накопления повреждений. Формулируются задачи исследования и способы её решения.

Вопросы построения моделей микромеханики композитов и получения численной оценки накопления микроповреждений являются предметом обширного круга работ, начиная с классических трудов С.Н. Журкова и Л.М. Качанова. Анализ разрушения композитов посвящены работы В.В. Болотина, В.В. Васильева, В.Д. Протасова, Ю.В. Немировского, Г.А. Ванина, Ю.В. Суворовой, А.М. Скудры, К. Чамиса, С. Цая, Э.М. Ву, М. Оуэна, Б. Колмена, Ф.К.Г. Одквиста, Я. Хултай других. Однако до настоящего времени остаются недостаточно исследованными вторичные процессы, сопровождающие накопление повреждений, в том числе тепловые эффекты. Между тем, косвенные проявления повреждения материала используются при неразрушающем контроле. Существующие методы диагностики композиционных материалов позволяют выявить дефекты сплошности, но не дают достоверной информации об опасности разрушения изделия с выявленными дефектами при эксплуатационной нагрузке. О.Н. Будадиным и А.Н. Пичугиным обнаружен эффект повышения температуры при неразрушающем статическом нагружении композиционных материалов, что создало предпосылки для разработки новых методов неразрушающей оценки прочности. Для этого необходимо математическое моделирование термомеханического поведения композиционных материалов на начальной стадии накопления микроповреждений, а также разработка алгоритмов и программ количественной оценки параметров разрушения путем интерпретации экспериментальных данных.

Во второй главе построена математическая модель термомеханического поведения тонкой пластины из композиционного материала при накоплении микроповреждений. Модель описывает отклик материала на механическое нагружение, сопровождающееся накоплением микроскопических повреждений: разрывов волокон и микротрещин в связующем. Накопление повреждений приводит к появлению необратимой деформации, которая определяется максимальным за всё время нагружения напряжением. Полная дефор-

мация равна сумме упругой и необратимой деформации. Структурная схема модели материала содержит два последовательно соединенных элемента – упругий и необратимо деформируемый (рис. 1). Работа напряжений на упругой деформации высвобождается при разгрузке, а работа на необратимой деформации частично затрачивается на структурные изменения материала, а частично переходит в тепло.

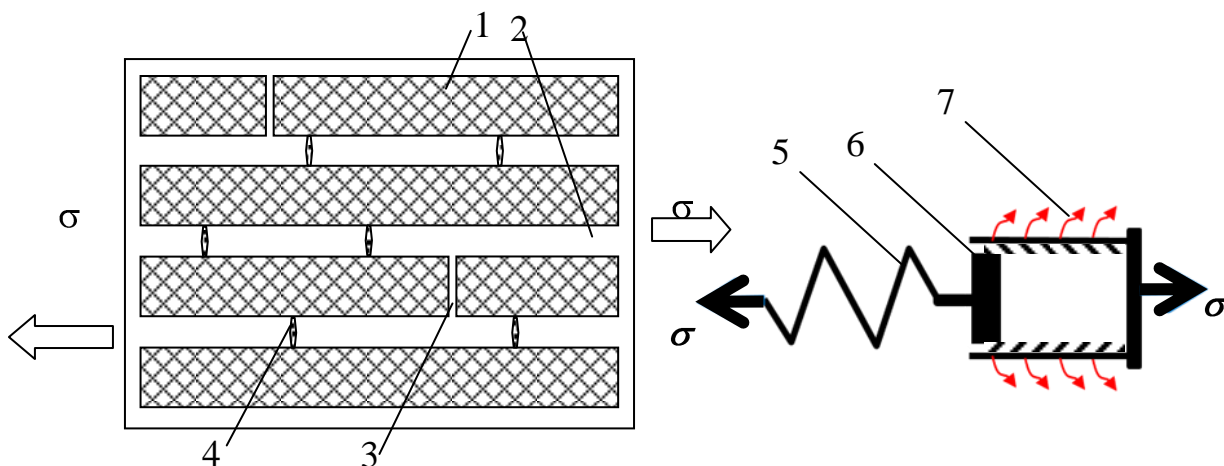


Рис. 1 – Модель необратимого деформирования с выделением тепла: 1 – волокно, 2 – связующее, 3 – разрыв волокна, 4 – микротрещина в связующем, 5 – упругий элемент, 6 – необратимо деформируемый элемент, 7 – тепловыделение

Параметры состояния подчиняются уравнению баланса энергии:

$$\sigma \cdot d\varepsilon - \frac{\sigma d\sigma}{E_0} - c\rho dT - \delta A_p = 0, \quad (1)$$

где σ – напряжение, ε – деформация, E_0 – модуль упругости при разгрузке, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность, T – температура, δA_p – работа, затрачиваемая на структурные изменения.

Скорость роста энтальпии материала в адиабатическом процессе предложено связать со скоростью диссипации механической энергии, которая, как известно, может быть определена по диаграмме деформирования материала:

$$\frac{d}{dt} W_{duc} = \sigma(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma(\varepsilon)}{E_0} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad c\rho \frac{dT_{ad}}{dt} = b \frac{dW_{duc}}{dt}, \quad (2)$$

где T_{ad} – изменение температуры при отсутствии теплообмена с окружающей средой. Показано, что для идентификации модели требуется обработка экспериментальных данных, которые могут быть получены при испытаниях квазистатической нагрузкой с равномерной деформацией: диаграмма деформирования и измеренная температура. Поскольку адиабатичность процесса нарушается теплоотдачей в окружающую среду, дополнительно учтен внешний конвективный теплообмен. В результате при однородной деформации полу-

чено следующее разностное уравнение для определения средней температуры с течением времени:

$$\frac{T^k - T^{k-1}}{\tau} + 2 \frac{h}{c_p H} T^k = \frac{b}{c_p} \cdot \frac{dW_{duc}(\varepsilon^k)}{d\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + 2 \frac{h}{c_p H} T_\infty, T^0 = T_0, \quad (3)$$

где H – толщина образца, h – коэффициент теплоотдачи в воздух, T_∞ – температура окружающей среды, k – индекс момента времени, τ – шаг по времени.

Для учета концентрации напряжений модель дополнена уравнением теплового баланса с учетом изменения температуры по объему:

$$\int_V c_p \frac{\partial T_{ad}}{\partial t} dV = \int_V c_p \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} dV + 2 \int_S h [T(x, y, t) - T_\infty] dS + \int_V \text{div} q dV, \quad (4)$$

где V – объем, S – поверхность, q – вектор плотности теплового потока. Уравнение (3) решается при начальном условии: $T(x, y, 0) = T_0$ и граничном условии: $T|_\Gamma = T_\infty$, где Γ – граница контакта с испытательным оборудованием. Дискретизация уравнения (4) методом конечных элементов с использованием процедуры Галеркина приводит к матричному дифференциальному уравнению, решаемому неявной разностной схемой по времени.

В третьей главе разработаны алгоритмы идентификации модели термомеханического поведения композиционного материала и исследована чувствительность модели к неравномерности деформаций. Поставлены и решены задачи:

1. Дано. Диаграмма «усилие-удлинение» в виде упорядоченного набора пар значений $(P_i, \Delta l_i)$, где i – номер точки на диаграмме, P_i – растягивающее усилие, Δl_i – абсолютное удлинение, площадь сечения образца F и расстояние между захватами испытательной машины l . Найти. Функцию $\sigma = \sigma(\varepsilon) \in C^1$,

где $\sigma = \frac{P}{F}$, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$, C^1 – пространство непрерывно дифференцируемых функций, удовлетворяющую условию минимума суммы квадратов отклонений вычисленных и измеренных усилий при одинаковых абсолютных удлинениях, при ограничениях: $\sigma(0) = 0$, $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} > 0$.

2. Дано. Диаграмма деформирования $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, скорость нагружения $\frac{d\varepsilon}{dt}$,

измеренные значения температуры в заданных точках образца в заданные моменты времени $T_k(t_i)$, где i – дискретное время, k – номер точки, и модель вида (1-3). Найти. Коэффициент теплового эффекта в (2), доставляющий минимум сумме квадратов отклонений значений измеренных и вычисленных температур при ограничении на неравномерность температурного поля: $\max_k |T_k - T_1| \leq M$, где M – пороговое значение. Ограничение имеет следую-

ший смысл: появление неравномерности поля температур соответствует переходу материала из стадии равномерного увеличения концентрации микродефектов в стадию образования макроскопического дефекта (разрушения).

Решение первой из этих задач основывается на аппроксимации диаграммы деформирования в виде решения дифференциального уравнения:

$$\sigma'' - (k_1 + k_2)\sigma' + k_1k_2\sigma = f(\varepsilon), \quad (5)$$

где $k_2 < k_1 < 0$ – корни характеристического уравнения, $f(\varepsilon)$ – линейная функция, определяющая вид диаграммы при больших деформациях.

Аппроксимирующая функция $\sigma(\varepsilon)$ содержит шесть настроечных параметров: k_1 , k_2 , начальный модуль упругости E_0 , касательный модуль упругости при больших деформациях и координаты точки перехода нелинейного участка диаграммы в линейный. Вариация настроечных параметров позволяет аппроксимировать нелинейную диаграмму деформирования, в том числе – характерную для полимерных композитов. Выбор наилучшей функции осуществляется путем варьирования параметров в заданных пределах с заданным шагом, что позволяет приблизиться к глобальному экстремуму критерия качества. По построенной аппроксимации диаграммы деформирования вычисляется работа напряжений на полной деформации, энергия упругой деформации и необратимо рассеянная механическая энергия.

Идентификация теплового эффекта деформации осуществляется путем обработки данных, полученных на термографическом комплексе. Используются измеренные значения температуры $T_k(t_i)$ в выбранных точках образца в моменты времени t_i до разрушения, что обеспечивает выполнение ограничения на неравномерность температуры. Значения, рассчитанные в соответствии с (3), линейно зависят от температуры среды и коэффициента теплового эффекта. Приняв за нуль начальную температуру, имеем:

$$T^k = b \cdot U^k + T_\infty \cdot V^k, \quad (6)$$

где U и V – сеточные функции, определяемые из разностных уравнений:

$$\frac{U^k - U^{k-1}}{\tau} + 2 \frac{h}{c\rho H} U^k = \frac{1}{c\rho} \cdot \frac{dW_{duc}(\varepsilon^k)}{d\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad U^0 = 0, \quad (7)$$

$$\frac{V^k - V^{k-1}}{\tau} + 2 \frac{h}{c\rho H} V^k = 2 \frac{h}{c\rho H} T_\infty, \quad V^0 = 0. \quad (8)$$

Условие минимума квадратичного критерия записывается в виде системы двух линейных алгебраических уравнений относительно b и T_∞ .

Методика идентификации апробирована при обработке результатов испытаний пластин из органопластика на одноосное растяжение. Эксперименты проведены О.Н. Будадиным и А.Н. Пичугиным[13]. Среднее выборочное для коэффициента теплового эффекта b по двум сериям общим объемом 19

образцов составило 0,432 при стандартном отклонении 0,089. Два образца пришлось исключить из рассмотрения вследствие отскока крайнего слоя, вызвавшего аномалию температуры.

Чувствительность модели к неравномерности поля деформаций исследована на пластинах с концентраторами напряжений. Использованы результаты испытаний 11 одинаковых пластин из того же материала с двумя полукруглыми вырезами на серединах сторон. Поле деформаций (рис. 2) для каждого уровня нагрузки рассчитано методом конечных элементов на той же сетке, что и поле температур.

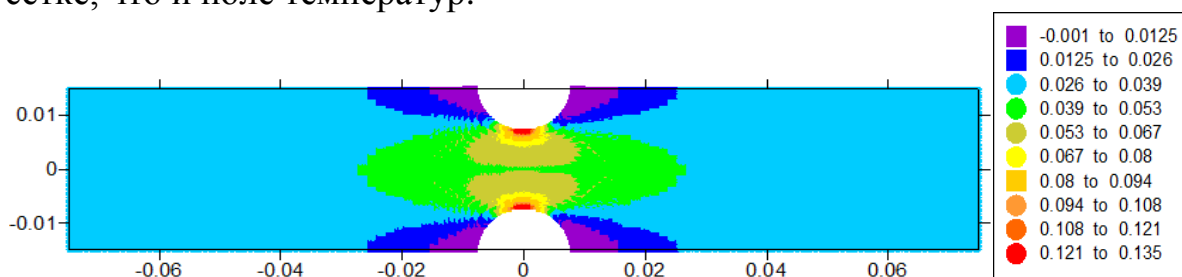


Рис. 2 – Поле деформаций пластины с концентраторами напряжений (в процентах)

На рис. 3 приведены термограммы пластины, полученные при испытаниях, и рассчитанные температурные поля в указанные на рисунке моменты времени после начала нагружения.

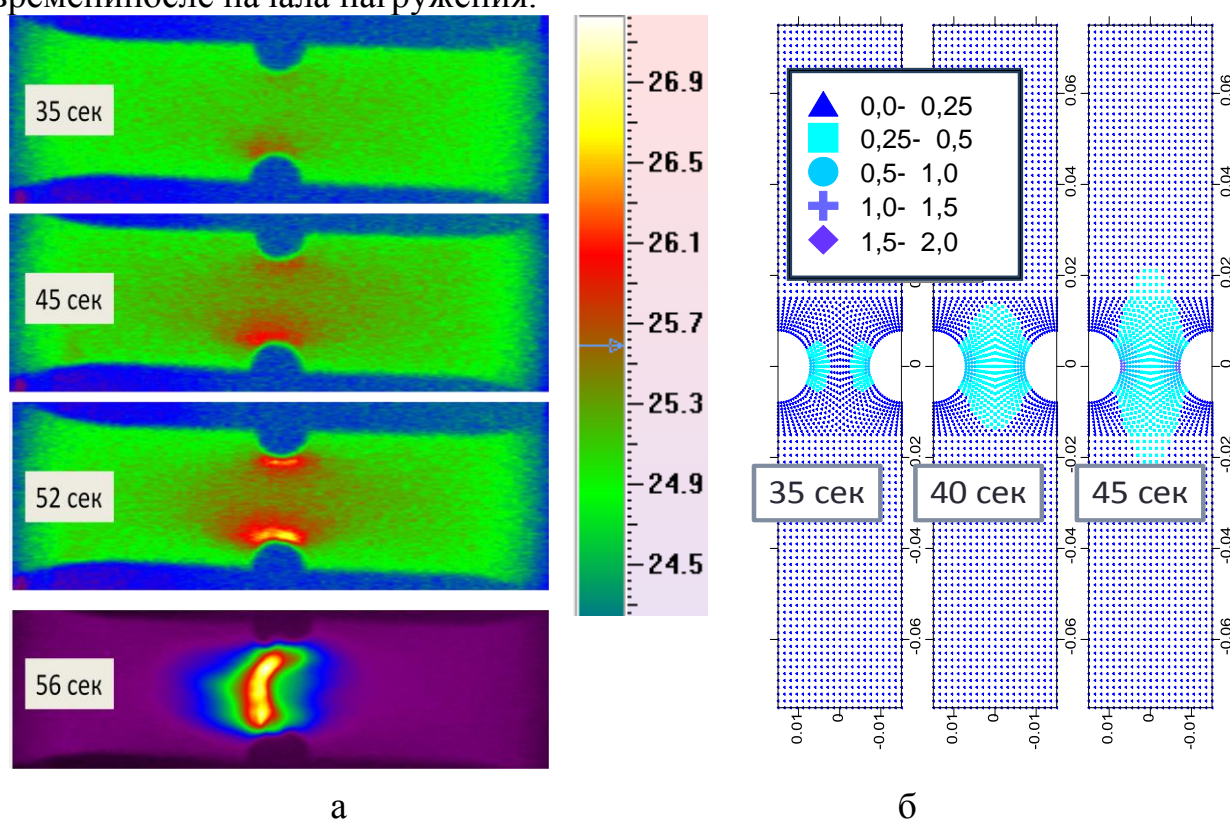


Рис. 3 - Термограммы образца (а) и рассчитанные поля температуры (б)

Найдено, что рассчитанные температуры согласуются с измеренными, а различие температур вблизи концентратора и на удалении достаточно для обнаружения зоны концентрации термографом уже при деформации 50% от предельной.

В четвёртой главе описано разработанное программно-методическое обеспечение.

В программе обработки идентификационных экспериментов реализованы алгоритмы аппроксимации диаграммы деформирования и расчета коэффициента теплового эффекта. Программа использует данные, импортированные из термографического комплекса, и предоставляет пользовательский интерфейс, позволяющий наглядно представить результаты идентификации. Методика использования программы при обработке данных измерений схематически показана на рис. 4.

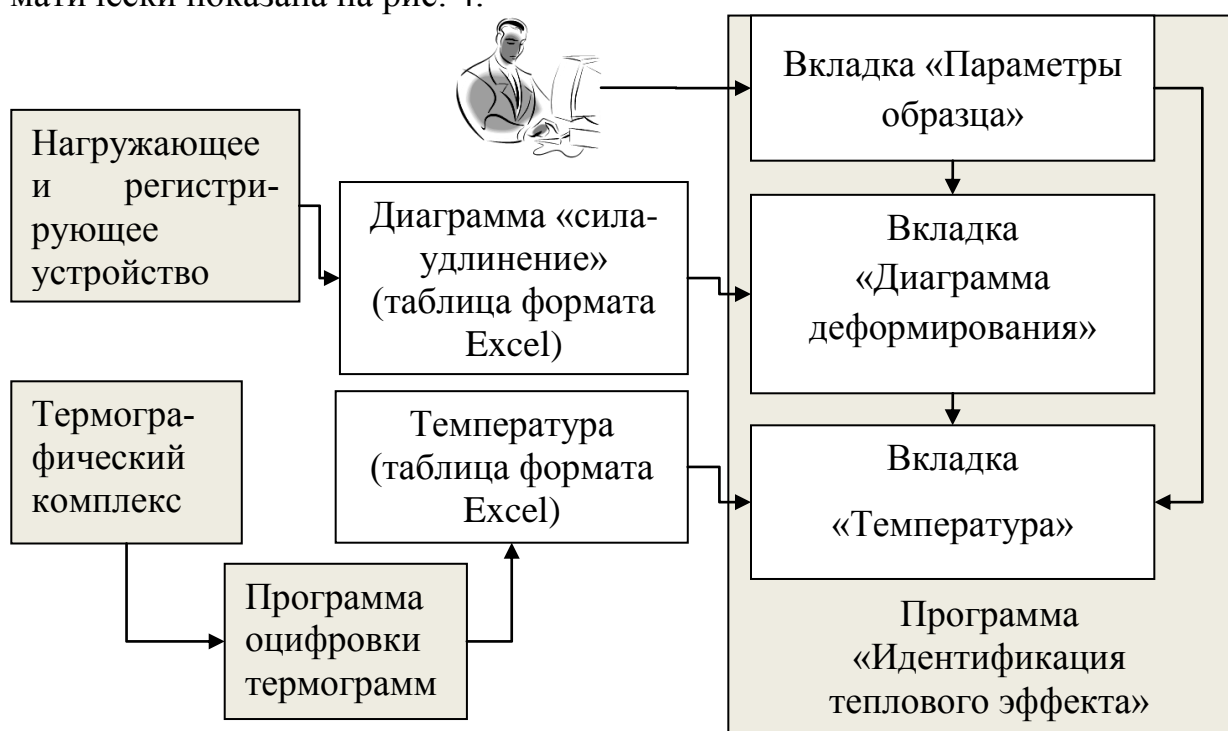


Рис. 4 – Схема обработки данных измерений при идентификации модели термомеханического поведения материала

Диаграмма нагружения регистрируется в электронном или графическом виде. В последнем случае таблица «сила-удлинение» заполняется вручную в формате Excel. Существующий термографический комплекс содержит программу оцифровки термограмм, которая позволяет экспортировать в файл таблицу значений температуры множества выбранных точек через интервал времени, определенный при записи термограммы.

Эти таблицы являются исходными данными для разработанной программы «Идентификация теплового эффекта». Оператор импортирует эти таблицы в программу и вводит размеры образца, известные физические ха-

рактические характеристики и скорость нагружения на вкладке графического интерфейса «Параметры образца». Последовательно переходя на вкладки «Диаграмма деформирования» и «Температура», оператор запускает вычисление настроечных параметров модели.

При реализации алгоритмов расчета термомеханического поведения переработан комплекс программ «Композит». С целью упрощения разработки и сопровождения программного комплекса в нём была реализована концепция автоматного программирования. Последовательность вычислений в усовершенствованном комплексе «Композит» представлена в виде взаимодействий функциональных объектов, которые вычисляют и хранят значения промежуточных результатов вычислений. Вычисление значения объекта рассматривается как результат некоторого отображения элемента множества значений объектов-аргументов на множество значений вычисляемого объекта. Методы, определяющие отображение, виртуальны и перекрываются при наследовании. Введено понятие «функционально-объектной схемы алгоритма», отражающей набор функциональных объектов и связи каждого объекта со своими аргументами.

Алгоритм программируется в виде функционально-объектной схемы с помощью набора визуальных компонентов. Эта схема транслируется в последовательность команд интерпретатора, управляющего функциональными объектами (рис. 5). Поведение объекта при посылке ему команд интерпретатора определяется диаграммой состояний конечного автомата.

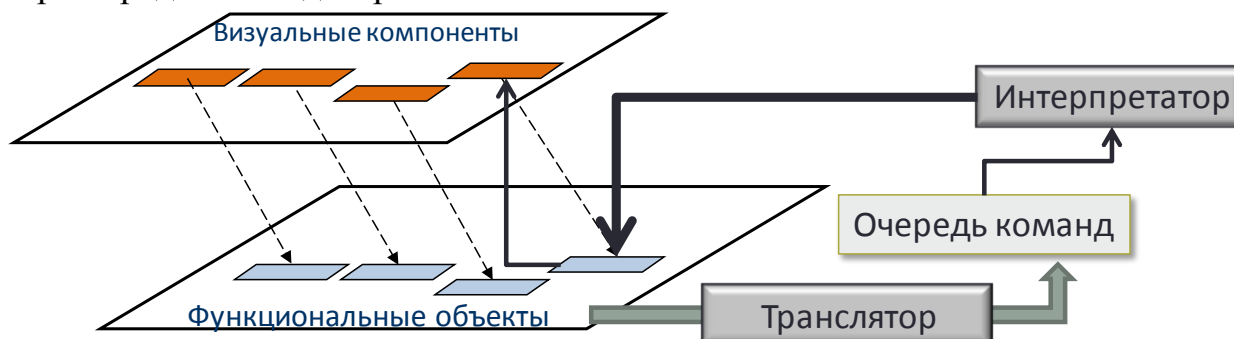


Рис. 5 – Усовершенствованная архитектура комплекса «Композит»

Поведение конечного автомата при выполнении команд интерпретатора вынесено на отдельный уровень иерархии классов и реализовано в базовом классе конечного автомата. Классы функциональных объектов, реализующие алгоритмы вычислительной механики, переработаны с учетом наследования от этого класса.

С использованием усовершенствованной версии комплекса программ «Композит» выполнена программная реализация алгоритма вычисления поля температур в элементах конструкций с концентраторами напряжений при накоплении микрповреждений. На рис. 6 показан интерфейс программы, вы-

полняющей один из шагов этого алгоритма – вычисление температурных полей с учетом теплового эффекта необратимой деформации.

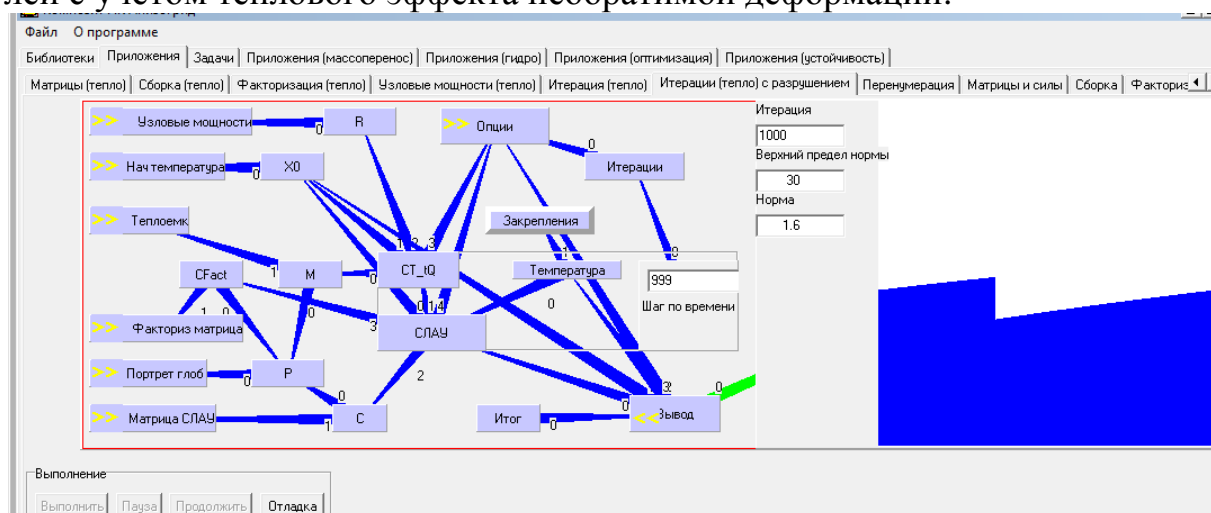


Рис. 6 – Интерфейс программы вычисления температурного поля с учетом теплового эффекта необратимой деформации

Поданы заявки на государственную регистрацию программы «Идентификация теплового эффекта деформации» и переработанной версии комплекса программ «Композит».

Заключение и выводы. В диссертации решена актуальная научно-техническая задача математического моделирования связанных процессов необратимого деформирования полимерных композиционных материалов и тепловыделения, обусловленного накоплением микрповреждений, и получены следующие выводы.

1. Построена математическая модель термомеханического поведения полимерного композиционного материала при статическом нагружении, включающая аппроксимацию диаграммы необратимого деформирования композиционного материала и определяющее соотношение, описывающее тепловыделение при накоплении микрповреждений, позволяющая связать скорость накопления микрповреждений с параметрами поля температуры.

2. Приближенное исследование чувствительности модели к соотношению предельных удлинений волокна и связующего показало, что наибольшая диссипация механической энергии должна проявляться для материалов с низко модульными волокнами с высоким разрывным удлинением, в которых накапливаются микротрещины в связующем.

3. Предложена аппроксимация нелинейной диаграммы деформирования в виде гладкого решения дифференциального уравнения с шестью настроечными параметрами, позволяющая описать экспериментально полученные диаграммы деформирования композиционных материалов, имеющие немонотонно изменяющийся касательный модуль.

4. Разработан алгоритм идентификации модели тепловыделения, состоящий в минимизации суммы квадратов отклонений вычисленных и изме-

ренных температур в образце, подверженном однородной деформации, на этапе равномерного накопления микроповреждений, и методика идентификации модели по данным испытаний стандартных образцов на разрывной машине с измерением поля температур термографическим комплексом.

5. Выведены дискретные уравнения в виде конечно-элементной схемы, позволяющие определять поля температуры в элементах конструкций с концентраторами напряжений из армированных композиционных материалов при квазистатической деформации с неравномерным тепловыделением на основе модели термомеханического поведения.

6. Теоретический порядок сходимости конечно-элементной схемы расчета температурного поля равен единице. Эффективный порядок сходимости в вычислительных экспериментах соответствует теоретическому.

7. Исследована чувствительность модели к неравномерности поля деформаций при статическом нагружении. Показано, что при растяжении пластины с концентраторами напряжений рассчитанная температура вблизи концентратора отличается от температуры на удалении от концентратора на 1-2 градуса, что достаточно для регистрации термографическим комплексом.

8. Алгоритмы идентификации модели термомеханического поведения реализованы в компьютерной программе, предоставляющей дружелюбный интерфейс для интерпретации экспериментальных данных. Программная реализация алгоритмов расчета температурных полей в элементах конструкций с концентраторами напряжений в усовершенствованном комплексе программ «Композит» выполнена на основе автоматной модели в рамках функционально-объектной парадигмы.

9. Результаты моделирования полей температуры согласуются с данными эксперимента на образцах из органопластика и подтверждают возможность обнаружения концентрации микроповреждений путем интерпретации данных измерения температуры при натурных испытаниях.

10. Результаты исследования вошли в Типовую методику ОАО ЦНИИ-ИСМ «Диагностика технического состояния сложных пространственных конструкций из полимерных композиционных материалов на основе теплового контроля в процессе силового нагружения», что подтверждено справкой об использовании результатов диссертации.

ОСНОВНЫЕ ТРУДЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. Каледин, В.О. Применение объектной декомпозиции математических моделей при разработке программного комплекса / В.О. Каледин, Е. В. Решетникова, Н. В. Нагайцева, Е. В. Равковская // В мире научных открытий. – 2013. – №10(46). – С. 121-141.

2. Нагайцева, Н.В. Особенности построения математических моделей в

программном комплексе «Композит-НК» / Н.В. Нагайцева, Е.В. Равковская // Наука и бизнес: пути развития. – 2013. – №10(28). – С. 48-51.

Статьи, опубликованные в сборниках научных конференций

3. Аринархова, Н.В. Графический интерфейс управляющей программы для численного решения связанных задач термомеханики / Н.В. Аринархова, Е.В. Равковская, В.О. Каледин // Инновации молодых: сб. науч. тр. / НФИ КемГУ; под общ.ред. Ф.И. Иванова, С.А. Шипилова. – Новокузнецк, 2011. – С.7-10.

4. Аринархова, Н.В. Управляющая программа для численного решения связанных задач термомеханики / Н.В. Аринархова, Е.В. Равковская // XII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, тезисы докладов – Новосибирск, 2011. – С.36.

5. Аринархова, Н.В. Управляющая программа для решения сопряженных задач термомеханики / Н.В. Аринархова, Е.В. Равковская // Решетневские чтения: материалы XVМеждународ. науч. конф., посвящ. памяти Генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева: в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2011. – Ч. 2. – С. 534.

6. Аринархова, Н.В. Автоматизация процесса программирования задач теплопереноса и деформирования при механических и температурных воздействиях/ Н.В. Аринархова // Инновации молодых: сб. науч. тр. / под общ.ред. Ф.И.Иванова, В.В. Дмитриева; НФИ ФГБОУ ВПО "КемГУ". - Новокузнецк, 2012. - С.18-20.

7. Аринархова, Н.В. Объектно-ориентированное проектирование численного решения связанных задач термомеханики конструкций / Н.В. Аринархова, Е.В. Равковская // Образование, наука, инновации - вклад молодых исследователей: материалы VII (XXXIX) Международной научно-практической конференции / Кемеровский госуниверситет: - Кемерово: 2012. - Вып. 13 / сост. Е.А. Баннова; под общей ред. К.Е. Афанасьева. - С.265-266.

8. Arinarkhova, N.V. Application of visual programming in problems of computing experiment / N.V. Arinarkhova, E.V. Ravkovskaya, V.O. Kaledin // Science and Education: materials of the international research and practice conference, Wiesbaden, June 27-28, 2012 / publishing office «Bildungszentrum Rodnike.V.». – c. Wiesbaden, Germany, 2012. – P. 49-51.

9. Каледин, В. О. Объектная декомпозиция конечно-элементных моделей / В.О.Каледин, Е.В.Решетникова, Н.В.Аринархова,Е.В.Равковская // Краевые задачи и математическое моделирование: сб. науч.ст. / НФИ КемГУ; под общ.ред. В.О. Каледина. – Новокузнецк, 2012. – С.275-293.

10. Arinarkhova, N.V. Application of the principles of visual and automata-based programming in the software package «Composite-2012» // Applied and

Fundamental Studies: Proceedings of the 2nd International Academic Conference. Vol. 1. March 8-10, 2013, St. Louis, Missouri, USA. – P. 65-68.

11. Аринархова, Н. В. Испытания на растяжение слоистой пластины из органопластика / Н.В. Аринархова // Инновации молодых: сб. науч. тр. / под общ.ред. Ф.И. Иванова, В. В. Дмитриева; НФИ КемГУ. – Новокузнецк, 2013. – С. 22-27.

12. Каледин, В.О. Программная система для алгоритмизации численного решения задач механики сплошной среды / В.О. Каледин, Я.С. Крюкова, Н.В. Аринархова, Е.В. Равковская // Тезисы докладов XXIII Всероссийской конференции «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности». – Новосибирск. – 2013. – С. 79-81.

13. Будадин, О.Н. Идентификация модели теплового эффекта при разрушении органопластика / Academicscience – problems and achievements II: сборник научных трудов. – NorthCharleston, SC, USA 29406, 2013 // Будадин О.Н., Каледин В.О., Нагайцева Н.В., Пичугин А.Н. – С.175-177.

14. Каледин, В.О. Методика и программная реализация аппроксимации диаграммы деформирования органопластика при одноосном растяжении / В.О.Каледин, Н.В.Нагайцева //IX международная научно-практическая конференция «Научный потенциал мира»/ Том 18. Математика. – 2013 г., Бял ГРАД-БГ, г. София, Болгария. – С. 19-24.

Нагайцева Наталья Валерьевна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ РАЗРУШЕНИИ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 21.01.2014 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.

Бумага писчая. Ризография.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд.л. 1,04. Тираж 100 экз.

Новокузнецкий институт (филиал) федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Кемеровский государственный университет»

654000, г. Новокузнецк, пр. Metallurgov, 19, тел. (3843) 74-15-41
Редакционно-издательский отдел