

UDC 539/2

Computer Simulation in Problems of Thermal Strength

Olga I. Chelyapina

RESC MSOU, Russia

142114, Podolsk, Moscow region, K.Gotvald street, st.2/40.

PhD

E-mail: chelyapina@pochta.ru

Abstract. This article discusses informative technology of using graphical programming environment LabVIEW 2009 when calculating and predicting the thermal strength of materials with an inhomogeneous structure. Algorithm for processing the experimental data was developed as part of the problem.

Keywords: thermal stresses; inhomogeneous materials; computer simulation; block diagram.

Введение. Прочностная надёжность элементов конструкций современной техники в значительной мере определяется свойствами используемых материалов. Перспективы развития промышленности связаны с разработкой новых функциональных материалов, имеющих высокий уровень прочностных характеристик. Использование таких материалов позволяет значительно повысить как ресурс, так и безопасность работы ответственных деталей и узлов машин и механизмов. Особое место среди новых материалов занимают структурно-неоднородные материалы. Последние обладают комплексом различных свойств, рациональное сочетание которых позволяет создавать оптимальные конструкции. Материалы с неоднородной структурой эксплуатируются в широком диапазоне температур, являются прочными, легко подвергаются механической обработке и сварке. Прочность и надёжность изделий в значительной степени определяется уровнем и характером распределения внутренних напряжений. Их возникновение обусловлено взаимодействием материала с энергией внешнего поля, воздействующего на материал конструкции. К внутренним напряжениям относятся температурные, остаточные, в окрестности структурных неоднородностей. Первые из них возникают при неоднородном распределении температурного поля в конструкциях. Безопасная эксплуатация изделий, работающих в условиях термического нагружения, во многом определяется термпрочностью конструкционных материалов. Для определения термонапряжений применяют целый ряд методов – аналитический, численный, экспериментальный. Использование аналитического метода ограничено, поскольку он не позволяет решать многие задачи для неоднородных структур. Экспериментальные методы требуют многофункционального лабораторного и производственного оборудования. Поскольку структурно-неоднородные материалы состоят из нескольких составляющих, отличающихся физико-механическими характеристиками, проблема достоверного расчёта и прогнозирования их механических свойств остаётся сложной задачей. В связи с развитием компьютерного моделирования появляется возможность прогнозирования термпрочности материала с неоднородной структурой [1]. В данной работе представлена блок-диаграмма в среде графического программирования LabVIEW 8.5 (National Instruments, США), позволяющая обрабатывать экспериментальные данные при аналоговом методе определения термонапряжений.

Математическое обоснование. Аналоговый метод определения термонапряжений базируется на эквивалентности математических формулировок плоской задачи термоупругости и задачи изгиба пластины идентичной геометрической конфигурации [2].

Задача определения термонапряжений в односвязной области с объёмным тепловыделением математически формулируется следующим образом (состояние плоской деформации)

$$\Delta \Delta F = \frac{\alpha E q_v(r)}{(1-\nu)\lambda}, \quad F = \frac{\partial F}{\partial r} = 0 \text{ при } r=R, \quad \sigma_{rr} = \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r}, \quad \sigma_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 F}{\partial r^2}, \quad \sigma_{zz} = \sigma_{zz} + \sigma_{\theta\theta}, \quad (1)$$

где F – функция напряжений, α – коэффициент термического расширения, E – модуль Юнга, $q_v(r)$ – мощность объёмного тепловыделения, ν – коэффициент Пуассона, λ – коэффициент теплопроводности, σ_{ik} – компоненты тензора термонапряжений. Функция прогиба жёстко закреплённой по внешнему контуру пластины (односвязная область) также подчиняется бигармоническому уравнению при соответствующих граничных условиях

$$\Delta\Delta w = \frac{P(r)}{D}, \quad w = \frac{\partial w}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r=R, \quad (2)$$

где w – функция прогиба пластины, $P(r)$ – распределённая нагрузка, D – жёсткость пластины.

С учётом коэффициента размерности χ имеем $[F]=[\chi w]$. По известному прогибу круглой модельной пластины определяем компоненты тензора термонапряжений

$$\sigma_{rr} = \frac{\chi}{r} \frac{\partial w}{\partial r}, \quad \sigma_{\theta\theta} = \chi \frac{\partial^2 w}{\partial r^2}, \quad \sigma_{zz} = \sigma_{zz} + \sigma_{\theta\theta}. \quad (3)$$

Распределённая нагрузка определяется путём комбинации правых частей бигармонических уравнений (1) и (2)

$$P(r) = \frac{\alpha E q_v(r) D}{(1-\nu)\lambda\chi}. \quad (4)$$

Под действием нагрузки $P(r)$ пластина деформируется.

Экспериментальная реализация. На рабочей части исследуемого образца в заданных точках устанавливаются датчики для измерения вертикальных перемещений. Аналоговые сигналы с датчиков по шасси передаются к модулю ввода/вывода NI PXIe-4330. Модуль ввода аналоговых сигналов выполняет аналого-цифровое преобразование входных сигналов и формируют цифровые значения измеренных аналоговых величин. Программное обеспечение LabVIEW напрямую взаимодействует с модулем и производит обработку измеренных смещений с помощью встроенных математических функций и разработанной структурной схемы, а также визуализирует полученные и обработанные результаты [3]. Таким образом, разработанный алгоритм переводит показания датчиков непосредственно в функцию безразмерных термических напряжений.

Блок-диаграмма. Далее представлены основные элементы рабочей схема и алгоритм работы блок-диаграммы при определении термонапряжений с использованием аналогового метода. Основными элементами рабочей схемы являются: нагруженная модельная пластина, набор датчиков, система регистрации результатов показания датчиков, система передачи данных на компьютер, а также блок-диаграмма (рис. 1), непосредственно разработанная в среде графического программирования LabVIEW.

На первом этапе заполняется массив координат заданных точек измерений. Затем результаты вертикальных смещений (прогиб пластины) экспортируются в файл и формируется массив экспериментальных значений для последующей обработки. Следующим шагом является полиномиальная аппроксимация величин прогиба методом наименьших квадратов и поиск среднего квадратического отклонения для оценки расхождений между данными эксперимента и аппроксимации. При достижении заданной точности величины расхождений задаётся переход от полученных полиномиальных коэффициентов к функциональной зависимости. На заключительном этапе работы алгоритма вычисляются первая и вторая производные от функции прогиба пластины. Далее осуществляется построение графов экспериментальных данных, аппроксимированной функции, первой и второй производных функции прогиба (рис. 2).

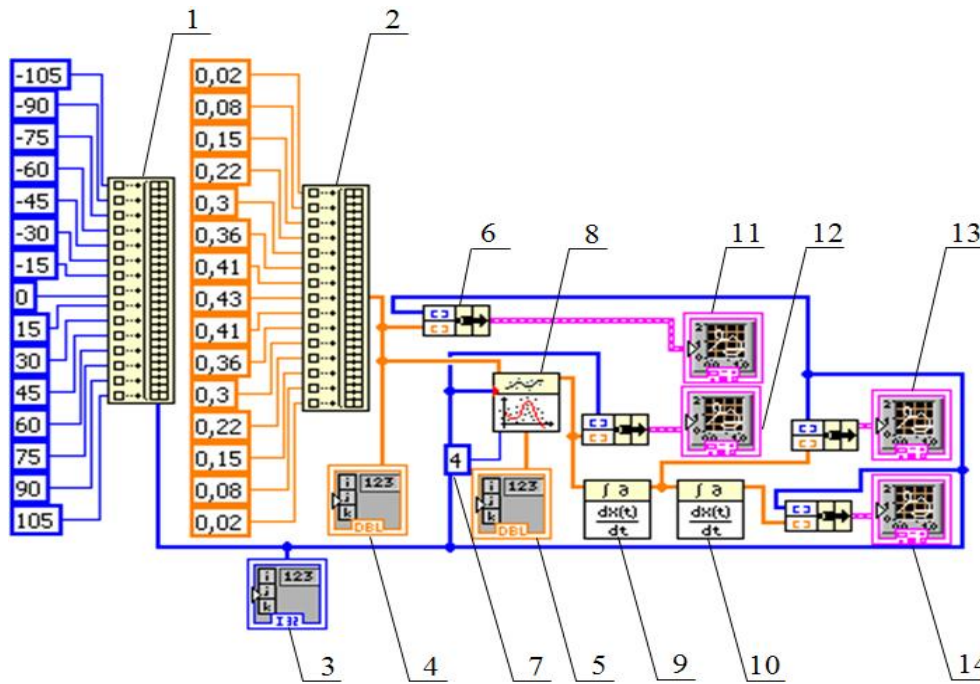


Рис. 1. Блок-диаграмма сбора и обработки данных виртуального прибора

1 – формирование массива шаговых значений (x); 2 – формирование массива экспериментальных значений (y); 3 – вывод шаговых значений; 4 – вывод экспериментальных данных; 5 – вывод коэффициентов полинома; 6 – сбор кластера для вывода графа экспериментальных данных; 7 – ввод степени полинома; 8 – аппроксимация; 9 – нахождение первой производной; 10 – нахождение второй производной; 11 – построение графа экспериментальных данных; 12 – построение графа аппроксимированной функции; 13 – построение графа первой производной; 14 – построение графа второй производной

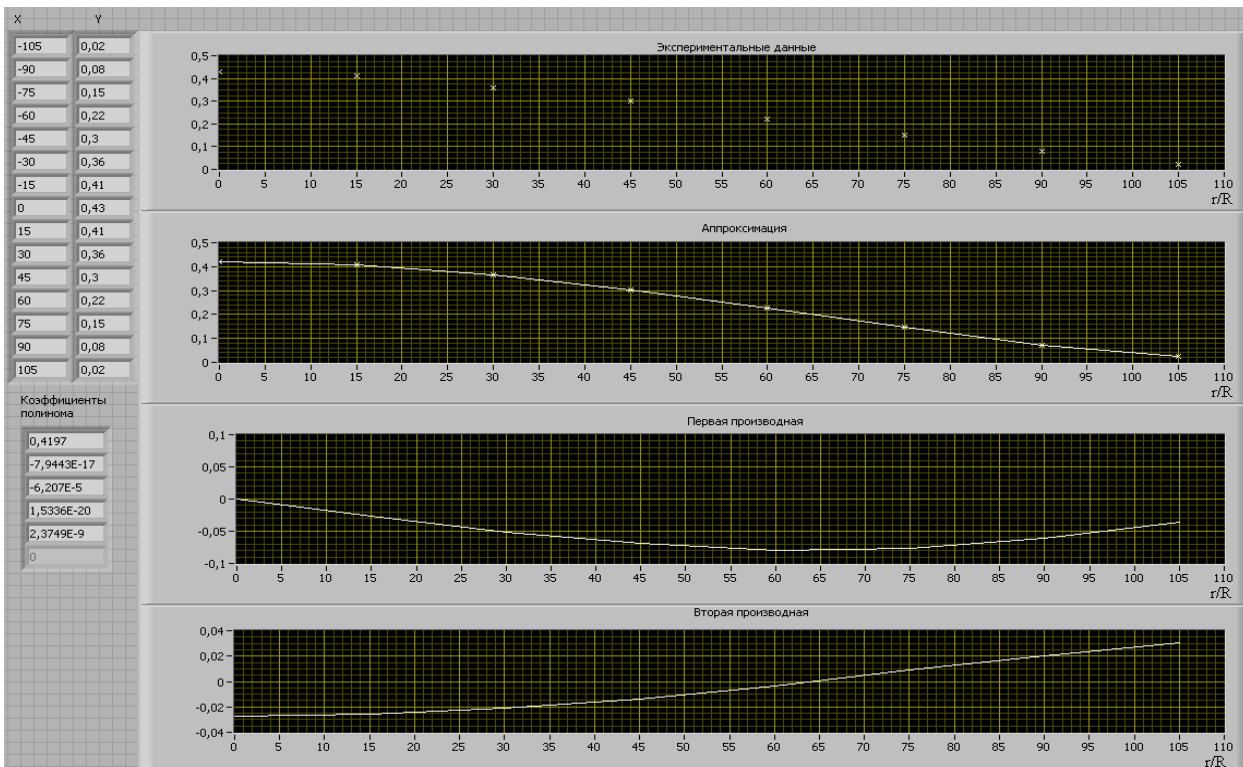


Рис. 2. Визуализация входных и обработанных экспериментальных данных при определении термонапряжений в окне программы LabVIEW 8.5 (r – текущий радиус, R – радиус пластины)

Результаты и выводы. Согласно математическим аналогиям в механике сплошной среды производные от функции прогиба определяют компоненты тензора термонапряжений. Результаты компьютерного моделирования сравниваем с расчётными данными. Визуализированные значения функции напряжений, полученные путём эксперимента, хорошо совпадают с расчётными данными. Таким образом, математическое моделирование результатов тестовых испытаний позволяет сделать следующие выводы:

1. Результаты компьютерного моделирования подтверждают достаточную для практических задач точность аналогового метода определения температурных напряжений;
2. Компьютерное моделирование функции прогиба пластины позволяет прогнозировать поведение материалов с различной неоднородной структурой в условиях температурных нагрузений.
3. Показана принципиальная возможность компьютерного моделирования термопрочностных свойств неоднородных структур в рамках поставленной задачи, используя предложенную схему и разработанный алгоритм на базе инженерного приложения среды LabVIEW 8.5.

Примечания:

1. Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Стефанов Ю.П., Макаров П.В., Чертов М.А. Моделирование поведения сложных сред на основе совместного использования дискретного и континуального подходов// Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 17. С. 7-13.
2. Иванов С.Д. Актуальные задачи моделирования технологических и температурных напряжений. М.: МГОУ, 1995, 271 с.
3. LabVIEW для всех/ Тревис Дж. Пер. с англ. Клушин Н.А. М: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005, 544 с.: ил.

УДК 539/2

Компьютерное моделирование в задачах термопрочности

Ольга Ивановна Челяпина

РОНЦ МГОУ, Россия
142114, г. Подольск, Московская область, Россия, ул. К. Готвальда, зд.2/40
доцент
E-mail: chelyapina@pochta.ru

Аннотация. В статье рассматривается информационная технология использования среды графического программирования LabVIEW 2009 при расчёте и прогнозировании термопрочности материала с неоднородной структурой. В рамках поставленной задачи разработан алгоритм обработки экспериментальных данных.

Ключевые слова: температурные напряжения; неоднородные материалы; компьютерное моделирование; блок-диаграмма.