

Петров М. Р., Петрова А. Н., Петров В. М.
M. R. Petrov, A. N. Petrova, V. M. Petrov

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИПЕРЭЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА В СЛУЧАЕ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ТОНКИХ СТЕРЖНЕЙ

THE STUDY OF HYPER ELASTIC MATERIAL CHARACTERISTICS IN CASE OF THIN ROD STRUCTURE CALCULATION

Петров Михаил Радиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и анализ структур и процессов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktpm@knastu.ru.

Mr. Mikhail R. Petrov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanics and Analysis of Structures and Processes, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktpm@knastu.ru.

Петрова Анна Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Petrovaan2006@yandex.ru.

Ms. Anna N. Petrova – PhD in Engineering, Assistant Professor, Software and Computer Application Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Petrovaan2006@yandex.ru.

Петров Владислав Михайлович – студент группы 5ПЭб-1 Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Petrovaan2006@yandex.ru.

Mr. Vladislav M. Petrov – a student of 5PE-1, Komsomolsk-on-Amur state technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Petrovaan2006@yandex.ru.

Аннотация. Статья посвящена исследованию деформационных характеристик гиперэластичного материала (резины), определению математической модели характеристик для расчетов конструкций из исследуемого материала.

Summary. The article investigates the deformation hyper elastic material characteristics, i.e. rubber, and determines a mathematical model to calculate the characteristics of test material structure.

Ключевые слова: деформационные характеристики гиперэластичного материала, большие деформации, шарнирно-стержневые конструкции.

Key words: deformation hyper elastic material characteristics, large deformation, hinged-rod structure.

УДК 539.3

На сегодняшний день одной из актуальных задач является расчет шарнирно-стержневых систем на нагрузки выше критических при работе конструкции в экстремальных условиях, при больших перемещениях узлов.

По сравнению с металлами эластомеры (натуральный и синтетический каучук) стали известны около 160 лет назад. Если эластомеры смогут занять заслуженное место в техническом применении, их изучение станет полным и всесторонним, как, например, изучение стали и других широко применяемых металлов.

Большие перемещения узлов шарнирно-стержневой конструкции могут возникать, например, в случае, когда конструкция выполнена из гиперэластичного материала, в том числе из резины.

Гиперэластичный материал (резина) обладает нелинейными физическими характеристиками. Кроме того, из-за больших перемещений конструкции, выполненные из такого материала, об-

ладают значительной геометрической нелинейностью, что создает определенные трудности при расчете таких конструкций классическими методами, например, методом конечных элементов.

Сложность расчетов конструкций из подобных материалов заключается в нестабильности характеристик материала из-за сложной внутренней структуры резины. Сложность заключается в том, что резина – полимер. Молекулярная структура резины представляет собой объемную сетку, способную к высокоэластичным деформациям благодаря невысокой плотности поперечных связей. При деформации резинового образца происходит переориентация молекул резины, вследствие чего изменяются физические свойства материала.

Поэтому перед началом расчета конструкции была проведена серия экспериментов с целью исследования характеристик материала. Основные физико-механические свойства материала были определены в результате испытаний на одноосное растяжение. Испытания проводились на установке, представленной на рис. 1.



Рис. 1. Испытание на одноосное растяжение

В результате проведения серии экспериментов была получена характеристика материала $P(\Delta)$, показанная на рис. 2.

Как видно из графика, зависимость $P(\Delta)$ нелинейная, следовательно, нелинейной будет зависимость $\sigma(\epsilon)$, которая должна быть аппроксимирована либо ломаной (несколькими прямыми), либо нелинейными функциями, например степенной (см. рис. 3) или полиномом n -го порядка.

Полученные зависимости были использованы в математической модели шарнирной стержневой системы [1] в методе контурных уравнений. Для сравнения использовалась линейная и степенная аппроксимации. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Аналогичные расчеты конструкции проводились в одной из систем автоматического проектирования: MSC.Marc. Она используется для анализа и оптимизации конструкций в авиакосмических, автомобильных, биомедицинских, химических, потребительских, строительных, электронных, энергетических и обрабатывающих отраслях промышленности. Программу MSC.Marc можно использовать для автоматического нелинейного анализа контактных проблем, которые часто

встречаются при обработке резины и металла давлением, а также во многих других сферах деятельности [2; 3].

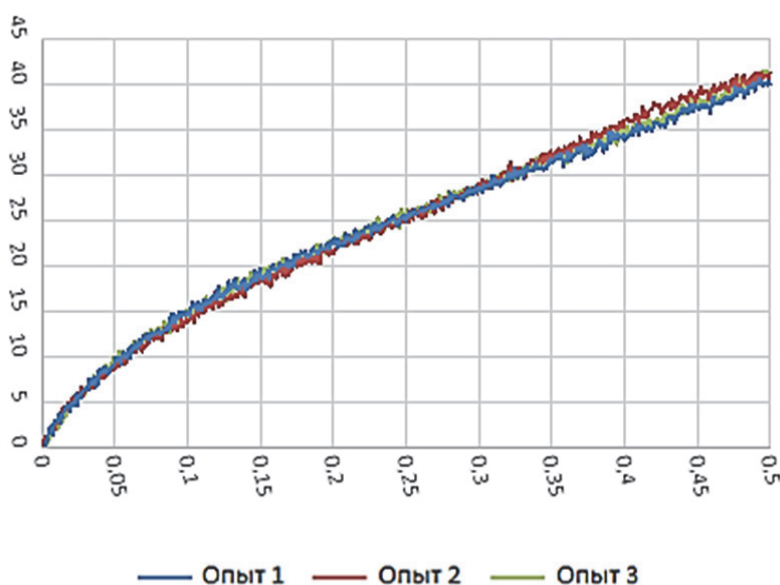


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $P(\Delta)$

Рассмотрены модели материала Neo-Hookean, Mooney, Mooney-Rivlin и Ogden. Каждая модель основывается на концепции функций энергии деформации, что обеспечивает эластичность материала.

При решении контактной задачи предполагается, что трение отсутствует. В работе использовался метод расчета Larg Disp. Расчеты проводились с различными характеристиками материала.

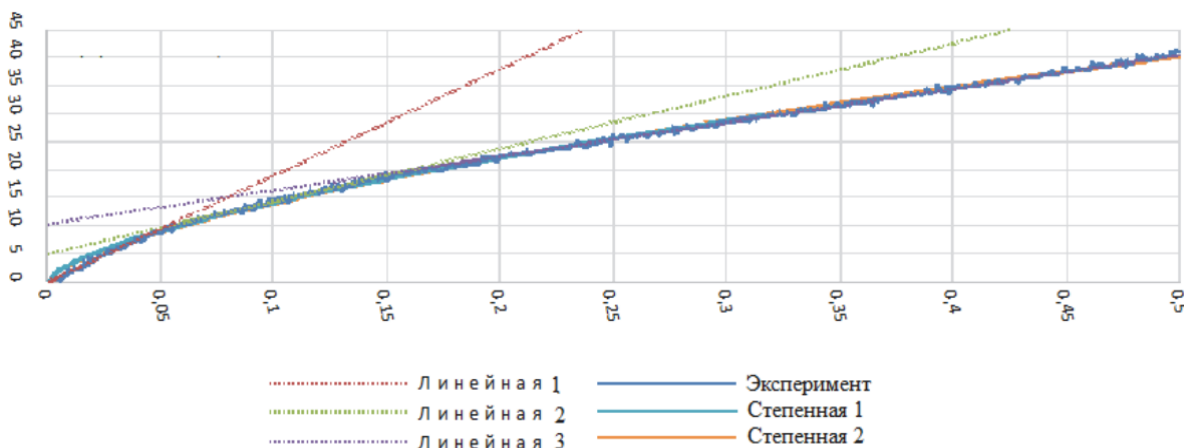


Рис. 3. Аппроксимация экспериментальных зависимостей $\sigma(\epsilon)$

Использовался метод расчета различных коэффициентов для задания гиперупругой модели материала с помощью модуля Experimental data fitting.

В ходе работы были рассмотрены 2 геометрические модели:

1. свойства материала в линейной модели;
2. для задания гиперупругого материала в нелинейной модели Mooney был использован график экспериментальных данных.

Сравнение применения различных математических моделей материалов и методов расчета проводилось по перемещению узла конструкции. За эталон принимались результаты экспериментальных замеров.

После определения перемещения узлов конструкции тремя способами (двумя расчетными и одним физическим) были получены четыре результата. В табл. 1 указано отклонение результатов расчета от результата, полученного в ходе физического эксперимента.

Таблица 1

Перемещение узла конструкции, мм

Аппроксимация	Метод конечных элементов, MSC.Marc	Метод контурных уравнений	Эксперимент
Линейная	191	94	82
Нелинейная	197	87	

Расхождение с результатом эксперимента у метода контурных уравнений составило 6 %, у метода конечных элементов – 192 %.

Широко распространенный метод конечных элементов (МКЭ) позволяет с высокой точностью рассчитывать конструкции из тонких стержней, используя балочные элементы типа BEAM. Такие балочные элементы не предусматривают гиперупругих характеристик материала и в основном применяются с идеально упругой или упруго-пластической характеристикой материала. Использование балочных элементов для расчета гиперупругих материалов может дать хорошие результаты лишь при относительно небольших деформациях с идеально упругой (линейно-упругой) характеристикой материала, где коэффициент Пуассона максимально приближен к 0,5. Для более точного расчета конструкции из гиперупругих материалов в МКЭ применяют объемные элементы типа тетраэдров, октаэдров и другие с характеристиками материала, определенными полиномом Муни – Ривлина. Полином Муни – Ривлина не всегда может обеспечить высокую точность и в различных вариациях его компонентов имеет значительные отклонения.

Модель Муни – Ривлина дает хорошее соответствие между специфической моделью материала и экспериментальными данными в случае расчета объемных трехмерных объектов. Однако коэффициенты этой модели могут быть получены только в результате многоосевых испытаний опытного образца, что в случае тонкого стержня представляет трудности технического характера.

Таким образом, расчет гиперупругих материалов в конечно-элементных пакетах, в том числе MSC.Marc/Mentat, использует полином Муни – Ривлина, который для наиболее точного результата требует большого количества различных испытаний материала. Поэтому для получения более точного результата необходимо провести дополнительные испытания.

Особенностью метода контурных уравнений является то, что он позволяет рассчитывать шарнирно-стержневые конструкции из гиперэластичного материала с нелинейными характеристиками и большими перемещениями узлов, состоящие из тонких стержней. Метод контурных уравнений также дает хорошие результаты при расчете шарнирно-стержневых систем, состоящих не из гиперэластичного материала, но имеющих большие перемещения узлов, например, гидротехнических сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическая модель шарнирной стержневой системы с большими перемещениями узлов / Н. А. Тарануха, К. В. Жеребко, А. Н. Петрова, М. Р. Петров // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2003. – № 3. – С. 12-18.
2. Marc® 2010 User's Guide / «MSC.Software Corporation», 2005.
3. Experimental Elastomer Analysis / «MSC.Software Corporation», 2005.