Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Саратовский государственный технический университет

имени Гагарина Ю.А.»

На правах рукописи

МИЩЕНКО Роман Викторович

РАСЧЕТ НЕОДНОРОДНЫХ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Специальность 05.23.17 – Строительная механика

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Академик РААСН,

доктор технических наук,

профессор

Петров Владилен Васильевич

Саратов - 2018

2

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

ГЛАВА 1. НЕОДНОРОДНЫЕ КОНСТРУКЦИИ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ

ПО ИХ ТОЛЩИНЕ ПРОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТРИСТИКАМИ.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА (ОБЗОР СОСТОЯНИЯ

ВОПРОСА) 19

1.1. Анализ и перспективы применения неоднородных конструкций 19

1.2. Способы создания неоднородности 20

1.3. Влияние упрочняющих технологий на прочностные и деформационные

характеристики конструкционных материалов 23

1.4. Обзор математических моделей расчета неоднородных конструкций 42

Выводы по первой главе 52

ГЛАВА 2. УРАВНЕНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ НАПРЯЖЕННО-

ДЕФОРМИРОВАННОЕ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ

КОНСТРУКЦИЙ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПО ТОЛЩИНЕ

ПРОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ 54

2.1. Инкрементальные уравнения изгиба неоднородной физически нелинейной пологой оболочки переменной толщины 54

2.2. Инкрементальное уравнение изгиба неоднородной физически нелинейной пластинки переменной толщины 67

2.3. Инкрементальное уравнение изгиба неоднородной физически нелинейной балки переменной толщины 74

2.4. Граничные условия 81

2.4.1. Граничные условия для пологих оболочек 81

2.4.2. Граничные условия для пластинок 82

2.4.3. Граничные условия для балок 83

з

2.5. Построение функции неоднородности 84

2.6. Метод решения линеаризованных уравнений 88

Выводы по второй главе 94

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА НЕОДНОРОДНЫХ ФИЗИЧЕСКИ

НЕЛИНЕЙНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ

КОНСТРУКЦИЙ 96

3.1. Решение задачи изгиба физически нелинейной балки при двусторонней и

односторонней неоднородности по толщине 96

3.2. Решение задачи изгиба физически нелинейной пластинки при двусторонней и

односторонней неоднородности по толщине 107

3.3. Решение задачи изгиба физически нелинейной пологой оболочки при

двусторонней неоднородности по толщине 116

Выводы по третьей главе 126

ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ

ТОНКОСТЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ 128

4.1. Решение задачи изгиба физически нелинейной балки переменной толщины

128

4.2. Решение задачи изгиба физически нелинейной пластинки переменной

толщины 134

4.3. Решение задачи изгиба физически нелинейной пологой оболочки переменной

толщины 141

Выводы по четвертой главе 147

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 149

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 151

4

ПРИЛОЖЕНИЕ А Основные соотношения в форме метода конечных разностей

для пологих оболочек, пластинок и балок 163

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Справки и акты о внедрении материалов диссертационного

исследования 182

ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельства о государственной регистрации программ для

ЭВМ 185

В этой диссертационной работе получила развитие методика расчета

неоднородных физически нелинейных тонкостенных пространственных

конструкций переменной толщины. В соответствии с проведенными

исследованиями сформулированы следующие выводы:

1. Анализ и систематизация экспериментальных данных и результатов научных исследований неоднородных материалов, методов создания технологической неоднородности и способов математического описания поведения неоднородных конструкций позволили получить аналитические зависимости для функций неоднородности, описывающие изменение прочностных характеристик материала в неоднородном слое по толщине конструкции;

2. Для численной реализации усовершенствованной инкрементальной математической модели расчета неоднородных конструкций переменной толщины в совокупности с предложенной методикой применения метода наискорейшего спуска для решения нелинейных задач и алгоритмом построения начального приближения разработано программное обеспечение для определения параметров напряженно-деформированного состояния неоднородных физически нелинейных пологих оболочек, пластинок и балок переменной толщины при различных вариантах исходных данных и граничных условий;

3. Использование разработанной методики и программного обеспечения позволило выполнить анализ эффектов вызываемых наличием физической нелинейности и неоднородности материала и переменной толщины и на основании полученных результатов выявлено, что наличие слоев неоднородности по толщине тонкостенной конструкции и переменной толщины приводит к существенному изменению параметров напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций, при их изгибе, под действием поперечной нагрузки;

150

4. Разработанный алгоритм расчета и программное обеспечение применимы для расчета неоднородных физически нелинейных пологих оболочек, пластинок и балок переменной толщины прямоугольной формы и прямоугольного поперечного сечения (для балок) при различных граничных условиях, при различных видах функции неоднородности и функции переменной толщины;

5. На основании проведенных исследований влияния факторов неоднородности материала и переменной толщины на напряженно-деформированное состояние рассматриваемых конструкций выявлено, что, наличие слоев неоднородности по толщине тонкостенных конструкций и переменной толщины, дает возможность направленного регулирования напряженно-деформированным состоянием конструкции. Важным аспектом является то, что при наличии неоднородности или переменной толщины, конструкция к ней адаптируется. И этот факт позволяет путем создания экзоскелета использовать в несущих конструкциях новые современные материалы с низкими прочностными характеристиками, но с высокими тепло- и звукоизолирующими свойствами, и малым весом.