



С. А. Бубнов, А. А. Бубнов, И. И. Овчинников

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ И ПОВРЕЖДЕННОСТИ
ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ,
ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ВОДОРОДНОЙ КОРРОЗИИ**

Издательство «Искусство»



С. А. Бубнов
А. А. Бубнов
И. И. Овчинников

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ И ПОВРЕЖДЕННОСТИ
ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ,
ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ВОДОРОДНОЙ КОРРОЗИИ**

Москва
Горячая линия – Телеком
2015

УДК 517.958:539.4.019.3

ББК 22.311

Б90

Рецензенты: академик РААСН, доктор техн. наук, профессор Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина *В. В. Петров*;
доктор техн. наук, профессор Волгоградского государственного университета
Г. А. Наумова

Бубнов С. А., Бубнов А. А., Овчинников И. И.

Б90 Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния и поврежденности трубчатых элементов конструкций, подвергающихся высокотемпературной водородной коррозии. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 156 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0417-0.

Изложено построение математической модели деформирования и разрушения трубчатых конструктивных элементов, подвергающихся высокотемпературной водородной коррозии, с использованием конечно-элементного подхода для обеспечения прогнозирования работоспособности конструкций в случае локального воздействия температуры и водородной среды.

Для специалистов, может быть полезно студентам и аспирантам технических вузов.

ББК 22.311

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Научное издание

**Бубнов Сергей Алексеевич, Бубнов Алексей Алексеевич,
Овчинников Илья Игоревич**

Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния и поврежденности трубчатых элементов конструкций, подвергающихся высокотемпературной водородной коррозии

Монография

Компьютерная верстка И. А. Благодаровой

Обложка художника О. В. Карповой

Подписано в печать 01.10.2014. Формат 60×88/16. Уч. изд. л. 9,75. Тираж 500 экз.
ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком»

ISBN 978-5-9912-0417-0

© А. А. Бубнов, С. А. Бубнов,
И. И. Овчинников, 2014, 2015

© Издательство «Горячая линия–Телеком», 2015

Оглавление

Введение	6
Глава 1. Обзор методов учета влияния водорода на элементы конструкций	7
1.1. Влияние водорода на механические свойства металлов.....	7
1.1.1. Низкотемпературное взаимодействие водорода с материалом	9
1.1.2. Водородная коррозия стальных конструкций	11
1.1.3. Инкубационный период	19
1.1.4. Фронт проникания агрессивной среды в объем конструктивного элемента	23
1.1.5. Показатели коррозии.....	26
1.1.6. Уравнение химического взаимодействия	28
1.2. Обзор моделей воздействия водорода на металлы.....	31
1.2.1. Основные модели деформирования и разрушения конструкций в условиях водородной коррозии	32
1.2.2. Обобщенная модель деформирования и разрушения конструкций в условиях водородной коррозии	42
1.3. Методы расчета конструкций с учетом воздействия водородной коррозии и неоднородного поля температур.....	44
Глава 2. Построение и анализ моделей деформирования конструкций, подвергающихся совместному воздействию нагрузки, теплового поля и водородсодержащей среды	47
2.1. Особенности влияния неоднородного поля температур на элементы конструкций.....	47
2.1.1. Влияние температуры на ползучесть элементов конструкций	47
2.1.2. Влияние температуры на механические свойства материалов конструктивных элементов.....	53

2.1.3. Влияние температуры на напряженно-деформированное состояние конструктивного элемента	57
2.2. Модель воздействия температуры	59
2.3. Модель воздействия водородсодержащей среды на конструктивный элемент с учетом влияния неоднородного поля температур	62
2.3.1. Распределение давления водорода по объему конструктивного элемента	62
2.3.2. Влияние распределения теплового и концентрационного полей по объему конструктивного элемента на поведение параметра химического взаимодействия	66
2.4. Модель деформирования материала в условиях воздействия высокотемпературной водородной коррозии	69
2.4.1. Линейное напряженное состояние	70
2.4.2. Сложное напряженное состояние	73
2.5. Моделирование поврежденности конструкций, находящихся в условиях водородной коррозии	74
2.5.1. Подходы к описанию поврежденности материала	75
2.5.2. Модель наступления предельного состояния	77
Глава 3. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций, подвергающихся водородной коррозии в неоднородном поле температур	82
3.1. Основные положения применения метода конечных элементов в инженерных задачах	82
3.2. Сравнительный анализ программных комплексов, реализующих метод конечных элементов	85
3.3. Дополнительные макросы к программному комплексу ANSYS, позволяющие учитывать процесс водородной коррозии в неоднородном поле температур	88
3.4. Исследование модернизированного программного комплекса на ряде типовых задач	91
3.5. Влияние густоты сетки и мелкости временного шага на точность получаемых результатов	93

3.5.1. Исследование влияния густоты сетки на сходимость решения задачи теплопроводности	93
3.5.2. Исследование влияния густоты сетки на сходимость решения структурной задачи	94
3.5.3. Исследование влияния временного шага на точность получаемых результатов	98
3.6. Моделирование напряженно-деформированного состояния и разрушения толстостенного трубопровода в условиях водородной коррозии и неоднородного поля температур	99
3.6.1. Напряженно-деформированное состояние и разрушение толстостенного трубопровода, находящегося под внутренним давлением водорода	100
3.6.2. Напряженно-деформированное состояние и разрушение толстостенного трубопровода, находящегося под двусторонним давлением водорода	109
3.6.3. Длительная прочность цилиндрического конструктивного элемента при различных давлениях, температурах и режимах нагружения	111
Заключение	113
Приложение 1	114
Приложение 2	119
Приложение 3	126
Приложение 4	135
Приложение 5	138
Библиографический список	141