ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 71188— 2024

Конструкции транспортные

ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЙ

Общие требования

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2024

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «ТЕСИС» (ООО «ТЕСИС»), Сколковским институтом науки и технологии, Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский институт стандартизации» (ФГБУ «Институт стандартизации»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 032 «Водный транспорт»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 декабря 2024 г. № 1836-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2024

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Сокращения 4
5 Общие положения 4
6 Твердотельная модель изделия 5
7 Конечно-элементная модель 5
7.1 Конечно-элементная сетка 5
7.2 Ориентация и задание свойств материалов 6
7.3 Имплементация моделей эксплуатационных повреждений 7
7.4 Сборка конечно-элементной модели 7
7.5 Начальные и граничные условия 7
8 Физико-механическая модель материала 7
8.1 Математическая формулировка физико-механической модели материала 7
8.2 Определение параметров физико-механической модели материала 8
8.3 Имплементация физико-механической модели материала в конечно-элементный решатель . . . 8
9 Валидация цифровой модели 9
10 Виртуальный испытательный стенд 9
11 Виртуальные испытания и анализ результатов 10
12 Документирование результатов виртуальных испытаний 10
Приложение А (справочное) Цифровая модель изделия 11
Приложение Б (справочное) Схемы пропорционального лучевого нагружения образцов при проведении испытаний образцов материала 12
Приложение В (справочное) Виртуальные испытания цифровой модели 13

Введение

В общем случае уровень контроля процессов производства недостаточен для исключения вариабельности характеристик изделий из структурно-неоднородных материалов (СНМ). Неоднородность и анизотропия СНМ в сложных изделиях не позволяют отделить процесс испытаний исходного материала от процесса испытаний конструкции в целом. Как правило, такие изделия создаются путем совмещения различных технологий производства и характеризуются высокой анизотропией свойств, обусловленной их сложной структурой. В результате для получения достоверной и полной характеристики изделий требуется проведение значительного количества испытаний экспериментальных образцов.

Современные средства виртуализации испытаний позволяют кардинально изменить соотношение между объемами моделирования и натурных экспериментов. Под виртуальными испытаниями понимается численное моделирование испытаний выбранного из парка псевдослучайного изделия при псевдослучайных условиях испытаний. Моделирование осуществляется методом конечных элементов (МКЭ).

В целевой конечно-элементной модели испытаний помимо всех существенных неопределенностей, присущих конструкции и испытаниям, каждый конечный элемент (КЭ) может иметь индивидуальные свойства, отличные от свойств соседних элементов. Такой подход реализует индивидуальную карту свойств КЭ, тем самым при произвольном случайном измельчении конечно-элементной сетки можно получить соответствующие случайные распределения свойств материала в объеме изделия в физически обоснованных диапазонах их изменений, обусловленных особенностями технологии производства изделий.

Поскольку адекватная оценка неопределенностей (разбросов) является принципиально важной для определения конструкционной надежности изделий из СНМ, а натурным испытаниям в рамках существующих методов подтверждения соответствия подвергаются только единичные, случайно выбранные экземпляры изделий, практически не существует альтернативы виртуальным испытаниям, когда результат определяется на основании цифровых моделей с использованием псевдослучайных свойств материалов и изделий — толщин, ориентации слоев, геометрии, условий испытаний и т. п. Такие виртуальные испытания способствуют выявлению вероятных спектров форм разрушения и соответствующих им наиболее вероятных предельных состояний.

Установленные в настоящем стандарте общие требования определяют порядок разработки цифровых моделей изделий, виртуальных испытательных стендов и проведения виртуальных испытаний изделий из СНМ общетехнического назначения в целях подтверждения соответствия изделий.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Конструкции транспортные

ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЙ

Общие требования

Transport structures. Virtual test benches and procedure for testing a digital model of products. General requirements

Дата введения — 2025—03—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт определяет общие рекомендации к разработке цифровых моделей и проведению виртуальных испытаний изделий из структурно-неоднородных материалов (СНМ) общетехнического назначения (далее — изделий). Положения настоящего стандарта могут быть применены для изделий из других материалов.

1.2 Настоящий стандарт предназначен для применения конструкторами, технологами, специалистами контроля качества, иными специалистами, связанными с проектированием, производством, испытаниями и с подтверждением соответствия изделий.

1.3 Настоящий стандарт предназначен для определения общих рекомендаций по разработке цифровых моделей и применению виртуальных испытаний изделий для подтверждения их соответствия.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 2.052 Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения

ГОСТ ISO/IEC 17025 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий

ГОСТ Р 8.563 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений

ГОСТ Р 8.568 Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения

ГОСТ Р 57700.10—2018 Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана дати-

Издание официальное

рованная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **структурно-неоднородный материал:** Материал, состоящий из двух и более однородных компонентов.

3.2 **физико-механическая модель материала**; ФММ: Совокупность соотношений между напряжениями и деформациями с параметрами, зависящими от напряженно-деформированного состояния и изменения характеристик свойств материалов в процессе эксплуатации изделия.

3.3 **параметры физико-механической модели материала**; ПФММ: Числовые коэффициенты и/или функциональные зависимости этих коэффициентов от характеристик свойств материалов в процессе эксплуатации изделия.

3.4 **базовый эксперимент**; БЭ: Натурный эксперимент (система экспериментов), позволяющий(ая) получить экспериментальные данные, необходимые для определения параметров физико-механической модели материала и критериев разрушения материала.

3.5 **верификация физико-механической модели материала:** Процесс установления соответствия физико-механической модели реальному поведению материала в процессе эксплуатации изделия на основании результатов натурных испытаний (системы испытаний) образцов материала.

3.6

цифровая модель изделия: Система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний по ГОСТ 16504 выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям.

[ГОСТ 57700.37—2021, пункт 3.23]

3.7

валидация модели изделия: Подтверждение адекватности модели моделируемому изделию.

[ГОСТ Р 57700.37—2021, пункт 3.2]

3.8 **конструктивно подобный образец**; КПО: Образец, имитирующий основные конструкционные элементы изделия или изделие целиком.

3.9 **базовая цифровая модель изделия**; БЦМ: Цифровая модель изделия, соответствие которой реальному поведению изделия в процессе эксплуатации установлено на основании результатов натурных испытаний.

3.10

конечно-элементная модель; КЭМ (сетка): Совокупность элементов достаточно простой геометрической формы и конечных размеров, на которые сплошно разбита конструкция, для которой численно моделируется напряженно-деформированное состояние.

[ГОСТ Р 57700.10—2018, пункт 3.8]

3.11 **конечно-элементный решатель:** Программный модуль, реализующий тем или иным численным методом решение математических уравнений, соответствующих модели поведения изделия.

3.12

напряженно-деформированное состояние; НДС: Множество действующих в каждой точке конструкции напряжений и деформаций в фиксируемый момент времени, возникающих из-за приложения к конструкции внешних воздействий (в том числе неравномерного поля температур).

[ГОСТ Р 57700.10—2018, пункт 3.16]

3.13

метод конечных элементов: Сеточный метод численного решения задач математической физики, в котором дискретизация исходных краевых задач производится на основе вариационных или проекционных методов при использовании специальных конечномерных подпространств функций, определяемых выбранной сеткой.

[ГОСТ Р 57186—2018, статья 2.3.6]

3.14

твердотельная (геометрическая) модель: Трехмерная электронная геометрическая модель, представляющая форму изделия как результат композиции множества геометрических элементов с применением операций булевой алгебры к этим геометрическим элементам.

[ГОСТ 2.052—2021, пункт 3.1.10]

3.15 **псевдослучайная цифровая модель изделия**; ПЦМ: Экземпляр цифровой модели изделия, генерируемый на основании базовой цифровой модели с использованием заданных распределений характеристик свойств материалов, технологических дефектов и эксплуатационных повреждений в объеме изделия, граничных и начальных условий, физико-механических воздействий, соответствующих условиям эксплуатации изделия.

3.16 **парк псевдослучайных цифровых моделей изделия**; ППЦМ: Совокупность псевдослучайных цифровых моделей изделия.

3.17

цифровой (виртуальный) испытательный стенд: Система, в общем случае состоящая из технических средств, программного, методического и организационного обеспечения и квалифицированного персонала, предназначенная для проведения стендовых испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) объекта испытаний.

[ГОСТ Р 57700.37—2021, пункт 3.26]

3.18

цифровые (виртуальные) испытания изделия: Определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) этого объекта.

[ГОСТ Р 57700.37—2021, пункт 3.27]

3.19

критерий отказа: Признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в документации.

[ГОСТ Р 27.102—2021, статья 40]

3.20

отказ: Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

[ГОСТ Р 27.102—2021, статья 36]

3.21

надежность (объекта): Свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования.

[ГОСТ Р 27.102—2021, статья 5]

3.22

показатель надежности: Количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

[ГОСТ Р 27.102—2021, статья 78]

3.23

нормируемый показатель надежности: Показатель надежности, значение которого регламентировано нормативной и технической документацией на объект.

[ГОСТ Р 27.102—2021, статья 112]

3.24

сертификационное требование: Заданное требование к продукции, которое должно быть выполнено заказчиком для прохождения или поддержания сертификации.

[ГОСТ Р ИСО/МЭК 17065—2012, пункт 3.7]

4 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения и сокращения:

ВИС — виртуальный испытательный стенд;

КЭ — конечный элемент;

МКЭ — метод конечных элементов;

ПО — программное обеспечение;

СНМ — структурно-неоднородный материал;

ТМ — твердотельная модель;

ЦМ — цифровая модель изделия;

МСМ — метод Монте-Карло (Monte Carlo Method);

CAD-система — компьютерная поддержка проектирования;

CAE-система — компьютерная поддержка инжиниринга;

FORM — метод линеаризации (First-Order Reliability Method или Advanced FOSM);

FOSM — метод двух моментов (First-Order Second-Moment);

SORM — метод квадратичной аппроксимации (Second-Order Reliability Method).

5 Общие положения

5.1 Порядок разработки и виртуальных испытаний ЦМ следующий (см. приложение А):

- разработка ТМ;
- построение КЭМ;
- разработка и имплементация ФММ материала в конечно-элементный решатель;
- валидация ЦМ изделия;
- виртуальные испытания ЦМ и анализ результатов.

5.2 ПО применяют для разработки ЦМ и проведения виртуальных испытаний по 5.2 ГОСТ Р 57700.10—2018.

5.3 При определении посредством проведения натурных испытаний и измерений характеристик свойств материалов и изделий, необходимых для разработки и определения параметров ФММ и валидации ЦМ изделий, должны быть учтены требования ГОСТ ISO/IEC 17025. Средства измерений должны быть поверены и (или) калиброваны; испытательное оборудование аттестовано в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.568; применяемые методики измерений должны быть аттестованы согласно требованиям ГОСТ Р 8.563. Испытания и измерения проводят аккредитованные испытательные лаборатории или под надзором представителей уполномоченных организаций.

5.4 Объем и виды виртуальных испытаний изделий определены программами испытаний, например программами испытаний на прочность, податливость и др.

5.5 В результате виртуальных испытаний изделий определяют показатель надежности, значение которого сравнивается с нормируемым показателем надежности, указанным в сертификационном требовании.

5.6 При изготовлении КПО для проведения валидационных экспериментов требования к контролю качества соответствуют требованиям контроля качества при изготовлении опытных образцов, прототипов изделий.

6 Твердотельная модель изделия

6.1 ТМ изделия должна соответствовать требованиям ГОСТ 2.052.

6.2 ТМ должна включать детали и компоненты изделия, существенные с точки зрения физико-механического поведения изделия в условиях эксплуатации.

6.3 ТМ изделия допускает редактирование средствами CAD-систем. Электронный формат файла ТМ изделия позволяет ее импортирование в CAE-системы для последующего построения конечно-элементной сетки.

6.4 Детализация ТМ должна обеспечивать построение конечно-элементной сетки без искажения формы конечных элементов (см. 7.1.3).

7 Конечно-элементная модель

7.1 Конечно-элементная сетка

7.1.1 КЭМ изделия должна соответствовать требованиям ГОСТ Р 57700.10.

7.1.2 КЭМ в зависимости от конфигурации рассматриваемого изделия должна включать основные конструктивные детали.

7.1.3 При моделировании конструкции изделия для построения регулярной сетки рекомендуется использование трехмерных гексагональных и двумерных (типа оболочка) КЭ. Для моделирования крепежных элементов, таких как анкеры, болты и заклепки, допускается применение одномерных КЭ. В таблицах 1 и 2 приведены параметры и их предельные значения, устанавливающие критерии качества конечно-элементной сетки ЦМ.

Таблица 1 — Критерии качества объемной конечно-элементной сетки цифровой модели

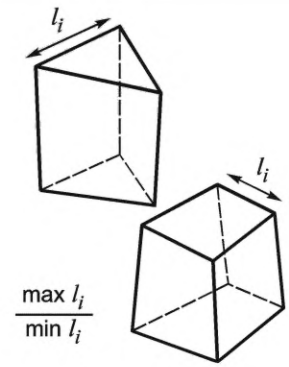
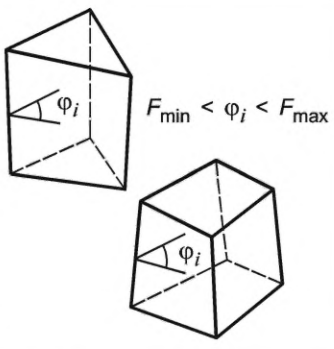
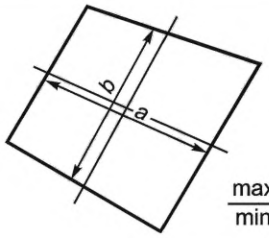
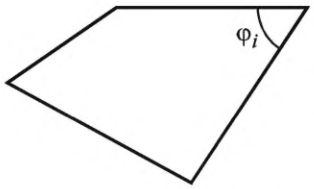
Параметр		Значение параметра	
		8-узловые объемные элементы	6-узловые объемные элементы
Соотношение длин ребер		10	10
Наименьший угол между гранями		10	10
Наибольший угол между гранями		160	160
Примечание — l_i — длина стороны элемента; φ_i — угол между гранями объемного элемента.			

Таблица 2 — Критерии качества оболочечной конечно-элементной сетки цифровой модели

Параметр		Значение параметра
		4-узловые оболочечные элементы
Соотношение длин сторон	 $\frac{\max a, b}{\min a, b}$	10
Наименьший угол между сторонами	 $F_{min} < \varphi_i < F_{max}$	10
Наибольший угол между сторонами		160

Примечание — a, b — длины отрезков, соединяющих середины сторон; φ_i — угол между гранями плоского элемента.

7.1.4 Допускается при построении конечно-элементной сетки упрощение исходной геометрии деталей путем исключения фасок, незначительных скруглений и отверстий. Упрощение исходной геометрии детали допускается только в обоснованных случаях, когда данное упрощение не оказывает существенного влияния на результаты расчетов действующих напряжений и деформаций в особо ответственных и/или наиболее нагруженных зонах детали. Указанные упрощения должны обеспечивать консервативность расчетов действующих напряжений и деформаций. При предоставлении результатов расчетов необходимо привести соответствующие обоснования указанных упрощений.

7.1.5 Для обеспечения наилучшего качества КЭ допускается исключение привязки узлов конечно-элементной сетки к геометрическим элементам детали (незначащие поверхности, линии и вершины) путем применения инструментов виртуальной топологии.

7.1.6 В случае применения трехмерных КЭ внешние узлы конечно-элементной сетки должны лежать на поверхности детали.

7.1.7 Пространственная дискретность КЭМ, размеры и порядок (линейные, квадратичные и др.) КЭ в регулярных зонах и зонах концентрации напряжений должны быть обоснованы асимптотической сходимостью результатов расчетов действующих напряжений и деформаций, выполненных на различных конечно-элементных сетках.

7.1.8 Условием сходимости решения является непревышение относительной разницей результатов расчетов перемещений, напряжений, деформаций, сил и моментов реакций, полученных на последних двух итерациях, значения 1 %.

7.2 Ориентация и задание свойств материалов

7.2.1 Ориентация свойств материала деталей изделия задана в локальных системах координат, ассоциированных с плоскостями (или осями) симметрии соответствующих деталей. Для криволинейных деталей локальная система координат может быть ассоциирована с кривой, образованной сечением произвольной плоскости симметрии.

7.2.2 Главные направления свойств материала деталей изделия могут быть определены на основе конструкторской и технологической документации в случае использования непрерывных армирующих элементов, таких как волокна и ткани. При отсутствии необходимой информации, а также при применении хаотически ориентированного наполнителя главные направления свойств СНМ можно выполнять на основании результатов анализа данных микроскопии поверхностей (шлифов) или анализа данных компьютерной томографии структуры контрольных образцов, вырезаемых из деталей или иным способом.

7.2.3 Если обоснована изотропия свойств материала, ориентацию свойств не задают. Изотропия свойств материала(ов) детали подтверждается на основании анализа результатов испытаний элементарных образцов, выполненных в соответствии с действующими стандартами.

7.2.4 Наборам КЭ присваивают соответствующие ФММ, ориентации и свойства материалов.

7.3 Имплементация моделей эксплуатационных повреждений

7.3.1 КЭМ изделия должна позволять имплементацию и параметризацию моделей типовых эксплуатационных повреждений.

7.3.2 Виды и характеристики повреждений определяют на основании анализа статистических данных повреждаемости изделий в эксплуатации и свойств материалов.

7.3.3 Техника моделирования эксплуатационных повреждений должна быть обоснована на основании результатов натурных испытаний элементарных образцов и КПО с нанесенными повреждениями, а также результатов неразрушающего контроля.

7.4 Сборка конечно-элементной модели

7.4.1 Детали изделия при сборке КЭМ изделия должны представлять собой непересекающиеся множества, с которыми ассоциированы соответствующие ФММ и ориентация свойств материалов. Между соответствующими множествами в сборке изделия задают условия контакта.

7.4.2 Задаваемые условия контакта должны обеспечивать непрерывность перемещений на контактных границах деталей.

7.4.3 Рекомендуется применять интерполяцию узлов конечно-элементной сетки, лежащих на контактных поверхностях, гладкими функциями.

7.4.4 Метод задания силовых взаимодействий контактных поверхностей деталей изделия должен быть обоснован.

7.4.5 Применяемый метод моделирования контактных взаимодействий деталей изделия должен быть единым при расчете различных случаев нагружения.

7.4.6 Метод моделирования контактных взаимодействий деталей должен быть подтвержден в ходе валидации ЦМ изделия.

7.5 Начальные и граничные условия

7.5.1 Начальные и граничные условия определены нормативными документами, определяющими требования к монтажу и эксплуатации изделия.

7.5.2 Граничные условия в виде перемещений применяют к узлам конечно-элементной сетки, соответствующим зонам сопряжения деталей изделия с внешними объектами.

7.5.3 Для изделий, эксплуатируемых в условиях температурных воздействий, начальные и граничные условия определяют дополнительно в виде температуры или интенсивности теплового потока на внешних поверхностях деталей изделия.

7.5.4 В качестве начальных условий в КЭМ изделия рекомендуется задать монтажные или остаточные технологические напряжения. Такие напряжения должны быть установлены в КЭМ в качестве начального самоуравновешенного поля напряжений.

8 Физико-механическая модель материала

8.1 Математическая формулировка физико-механической модели материала

8.1.1 ФММ должна описывать:

- связь напряжений и деформаций в изделии посредством алгебраических уравнений, выражающих компоненты тензора напряжений через соответствующие им компоненты тензора деформаций;
- стадию упругого деформирования деталей изделия, соответствующую условию потенциальности;
- стадию пластического деформирования деталей изделия, соответствующую условию выпуклости поверхности текучести.

8.1.2 Для упругой стадии деформирования деталей изделия должны быть выполнены условия потенциальности; для пластической стадии деформирования должно быть соблюдено условие выпуклости поверхности текучести.

8.1.3 ФММ может учитывать функциональную зависимость характеристик свойств СНМ от воздействия агрессивных сред и температур, если отсутствие этой зависимости не подтверждено результатами экспериментальных исследований СНМ деталей изделия.

8.1.4 Пример математического выражения ФММ приведен в приложении Б.

8.2 Определение параметров физико-механической модели материала

8.2.1 Определение параметров (идентификация) ФММ осуществляют на основании анализа результатов БЭ, реализующих различные виды НДС в материале при различных физико-химических воздействиях (температура, влажность, агрессивные среды). Рекомендуется в качестве БЭ выбирать испытания, соответствующие требованиям действующих стандартов.

8.2.2 Программа БЭ для идентификации ФММ должна включать различные варианты пропорционального нагружения образцов. Рекомендуемые схемы пропорционального нагружения образцов приведены в приложении В.

8.2.3 Результаты БЭ подвергают статистической оценке достоверности результатов. Для этого рекомендуется применять следующие математически обоснованные методы оценки:

- оценка доверительных границ для среднего значения при неопределенной генеральной дисперсии;
- оценка среднеквадратического отклонения;
- оценка принадлежности опытного распределения нормальному закону;
- другие методы.

8.2.4 После оценки достоверности результатов БЭ вычисляют статистические характеристики: функция распределения, математическое ожидание, стандартное отклонение, коэффициент вариации, коэффициенты корреляции.

8.2.5 На основании полученных статистических характеристик материала в соответствии с видом БЭ вычисляют значения нормативных и расчетных характеристик материала согласно заданному доверительному интервалу. Посредством этих характеристик определяются коэффициенты надежности по материалу. При определении нормативных характеристик материала значение доверительного интервала принимают равным 1,64, что соответствует доверительной вероятности 95 %. При определении расчетных характеристик материала значение доверительного интервала рекомендуется принимать не менее 3, что соответствует доверительной вероятности 99,87 %. Допускается изменение значения доверительного интервала при соответствующем обосновании.

8.2.6 Достоверность ФММ должна быть подтверждена при валидации ЦМ изделия.

8.3 Имплементация физико-механической модели материала в конечно-элементный решатель

8.3.1 ФММ имплементируется в конечно-элементный решатель через интерфейс пользовательских процедур, если применяемое ПО не допускает прямого применения данной ФММ. Корректность имплементации подтверждают путем решения тестовых задач.

8.3.2 Пользовательская процедура должна выполнять следующие функции:

- реализовывать математическую формулировку ФММ;
- обеспечивать вычисление напряжений и деформаций во всех точках интегрирования соответствующих КЭ деталей изделий;
- допускать использование переменных состояния, зависящих от решения;
- обновлять значения напряжений и переменных состояния, зависящих от решения в конце инкремента расчета, на котором эта процедура вызывается;
- обеспечивать задание локальной ориентации свойств материала;
- обеспечивать устойчивость схемы интегрирования;
- обеспечивать использование точного определения согласованного якобиана через изменение напряжения Кирхгофа для быстрой сходимости решения согласно

$$\delta(J\sigma) = J(C : \delta D + \delta W \cdot \sigma - \sigma \cdot \delta W), \quad (1)$$

где J — детерминант градиента деформации;

σ — напряжение Коши;

δD — виртуальная скорость деформации;

δW — виртуальный тензор спина, определяемый по формулам:

$$\delta D = sym(\delta F \cdot F^{-1}), \quad (2)$$

$$\delta D = asym(\delta F \cdot F^{-1}). \quad (3)$$

Для определяющих соотношений в форме приращений точный согласованный якобиан определен выражением

$$C = \frac{1}{J}\frac{\partial \Delta(J\sigma)}{\partial \Delta \varepsilon}. \quad (4)$$

9 Валидация цифровой модели

9.1 Порядок валидации ЦМ должен соответствовать требованиям ГОСТ Р 57700.10. Валидацию ЦМ изделия осуществляют в следующем порядке:

- моделирование натурных испытаний КПО с использованием ЦМ;
- натурные испытания КПО;
- сравнительный анализ результатов моделирования и результатов натурных испытаний КПО.

9.2 Валидацию ЦМ изделия осуществляют на основании результатов натурных испытаний КПО. При изготовлении образцов изделия для проведения валидационных экспериментов требования к контролю качества соответствуют требованиям контроля качества при изготовлении опытных образцов, прототипов изделий.

9.3 Экспериментальные КПО должны включать типовые эксплуатационные повреждения. При проведении испытаний КПО рекомендуется выполнить неразрушающий контроль с целью выявления корреляционных зависимостей характеристик свойств материала в объеме изделия. Выбор вида испытаний образцов изделия, применяемых для валидации ЦМ, должен быть обоснован.

9.4 Рекомендуется выполнить неразрушающий контроль КПО для выявления корреляционных зависимостей характеристик свойств материала.

9.5 Моделирование натурных испытаний КПО с использованием ЦМ проводят в детерминированной постановке, с постоянными по объему ЦМ характеристиками свойств материалов. Нагрузки и воздействия принимают детерминированно.

9.6 Сравнительный анализ результатов моделирования и результатов натурных испытаний КПО проводят на основе данных тензометрирования, цифровой корреляции изображений, макропараметров (например, прогиб и сила реакции), величин разрушающих нагрузок и соответствующих им перемещений (деформаций), областей и типов разрушения, поверхностей разрушения изделий.

9.7 Валидированная ЦМ изделия принимает статус БЦМ, на основе которой затем генерируется ППЦМ и проводятся виртуальные испытания изделия, в том числе в целях подтверждения соответствия надежности изделия сертификационному требованию.

10 Виртуальный испытательный стенд

10.1 ВИС моделирует многофакторные физико-механические воздействия на изделие (см. приложение Г). ВИС должен обеспечивать:

а) задание статистических характеристик в расчетном пространстве ЦМ;

б) генерацию совокупности расчетных файлов ПЦМ изделия (ППЦМ) на основе БЦМ для псевдослучайных величин:

1) характеристик свойств материалов и их корреляции в объеме изделия,
2) схем армирования изделия и осей анизотропии,
3) статистических характеристик форм и размеров изделия в заданных технологических допусках,
4) статистических характеристик физико-механических нагрузок (при наличии),
5) граничных условий,
6) климатических воздействий,
7) статистических характеристик технологических и монтажных напряжений,
8) эксплуатационных повреждений и их корреляции в объеме изделия;

в) проведение расчетов ППЦМ изделий;

г) статистический анализ и обработку результатов расчетов.

10.2 ППЦМ изделия должен включать все существенные неопределенности, обусловленные особенностями технологии производства изделия, применяемых исходных материалов и компонентов, условий эксплуатации изделия. Каждый экземпляр ПЦМ в ППЦМ имеет индивидуальные карты характеристик свойств и типовых эксплуатационных повреждений, которые отражают их корреляции по объему изделия. Характеристики свойств материалов по объему экземпляров ПЦМ для каждого КЭ модели принимают случайные отклонения от средних значений на основании полученных статистических характеристик и корреляционных зависимостей.

10.3 Для статистического анализа результатов расчетов при оценке надежности изделий в ВИС рекомендуется применять обоснованные методы вероятностных расчетов и теории надежности:

- MCM;
- FOSM;
- FORM;
- SORM;
- другие методы.

11 Виртуальные испытания и анализ результатов

11.1 Виртуальные испытания изделия проводят путем расчетов ППЦМ (см. приложение Г).

11.2 Количество экземпляров ПЦМ, необходимых для проведения виртуальных испытаний, определено вариабельностью условий эксплуатации, значений характеристик свойств материалов и эксплуатационных повреждений в объеме изделия.

11.3 Виртуальные испытания изделия проводят с целью определения показателя надежности. Показатель надежности определяют как отношение разности количества ПЦМ, подвергнутых испытаниям, и количества ПЦМ, для которых выполнен критерий отказа, к количеству ПЦМ, подвергнутых испытаниям.

11.4 Значение показателя надежности, определенное в ходе виртуальных испытаний ППЦМ, сравнивают с нормируемым показателем надежности.

11.5 Критерий отказа изделия и нормируемый показатель надежности рекомендуется определять сертификационным требованием или нормативными документами, такими как: технические условия, стандарт организации, своды правил, технические спецификации.

11.6 Результатом соответствия изделия сертификационному требованию или требованиям нормативных документов является значение показателя надежности, полученное в ходе виртуальных испытаний, не менее чем значение нормируемого показателя надежности.

12 Документирование результатов виртуальных испытаний

Протоколы и техническое заключение по результатам виртуальных испытаний изделия оформляют в соответствии с ГОСТ ISO/IEC 17025.

Приложение А
(справочное)

Цифровая модель изделия

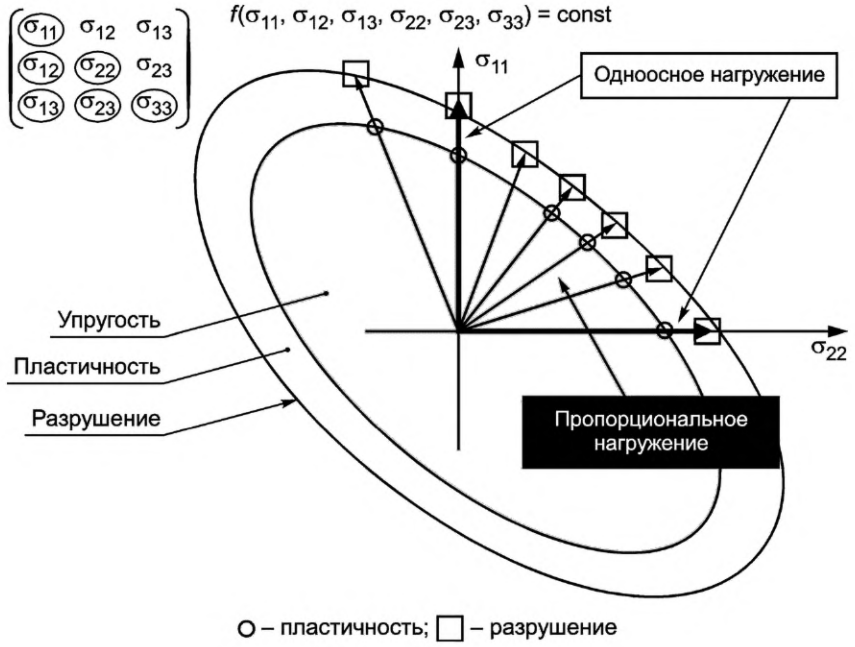


Рисунок А.1 — Схема создания цифровой модели изделия

Приложение Б
(справочное)

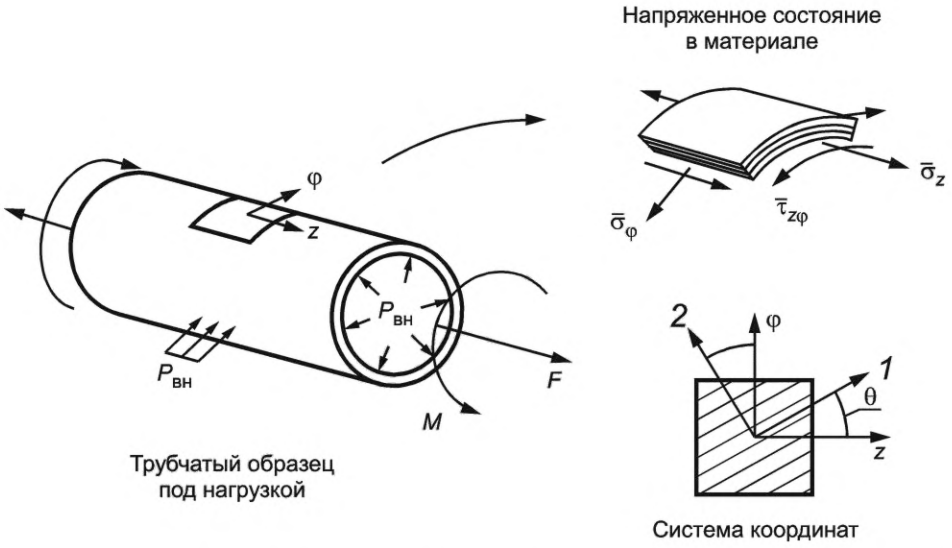
Схемы пропорционального лучевого нагружения образцов при проведении испытаний образцов материала

Определение параметров (идентификация) ФММ осуществляется на основании анализа результатов БЭ, реализующих различные виды НДС в материале (рисунки Б.1, Б.2).



σ_{ij} — компоненты тензора напряжений, $f(\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{22}, \sigma_{23}, \sigma_{33})$ — критерий пластичности/разрушения

Рисунок Б.1 — Схемы пропорционального нагружения



$P_{вн}$ — внутреннее давление цилиндрического образца; F — сила вдоль цилиндрического образца; M — крутящий момент; $\bar{\sigma}_\varphi$ — напряжения в окружном направлении; $\bar{\sigma}_z$ — напряжения в осевом направлении; $\bar{\tau}_{z\varphi}$ — сдвиговые напряжения; θ — угол ориентации материала

Рисунок Б.2 — Схема пропорционального нагружения трубчатых образцов

Приложение В
(справочное)

Виртуальные испытания цифровой модели

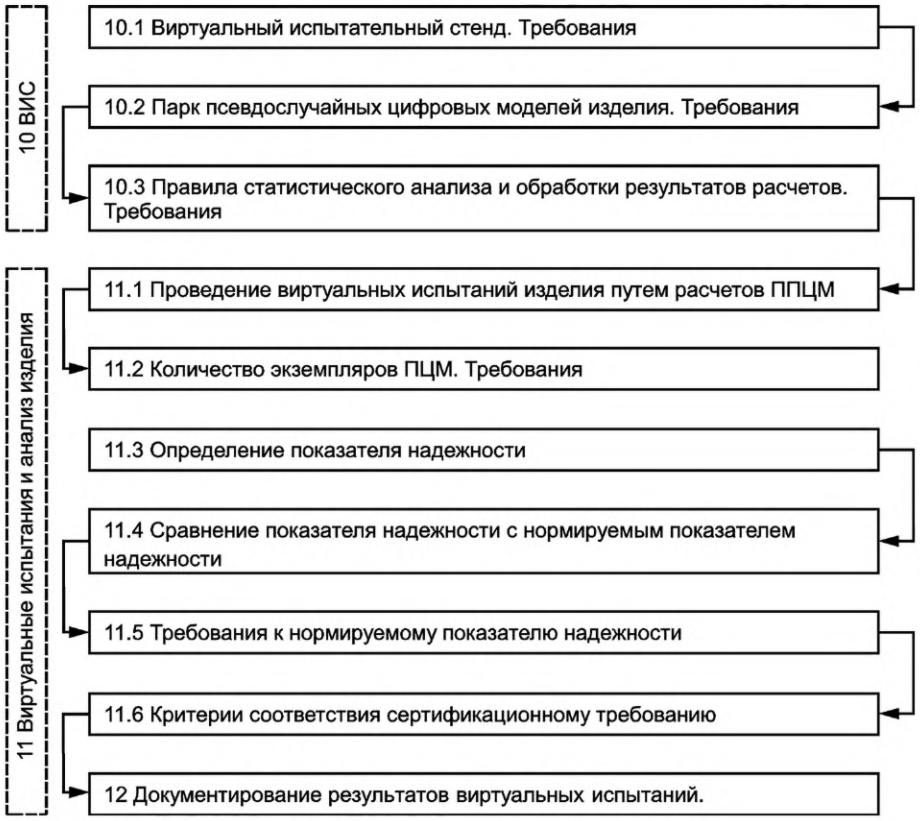


Рисунок В.1 — Схема виртуальных испытаний изделия

УДК 006.354:004.942:006.354

ОКС 03.220
35.240

Ключевые слова: структурно-неоднородный материал, цифровая модель, виртуальные испытания, виртуальный испытательный стенд, метод конечных элементов

Редактор *Л.С. Зимилова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 09.12.2024. Подписано в печать 17.12.2024. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2,12.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru