ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 57700.42— 2023

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Общие положения

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2024

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана») и Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский институт стандартизации» (ФГБУ «Институт стандартизации») при участии Объединения юридических лиц «Союз производителей композитов» (Союзкомпозит)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 700 «Математическое моделирование и высокопроизводительные вычислительные технологии»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 ноября 2023 г. № 1425-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 «Российский 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, определения и сокращения 2
4 Общие положения 11
Приложение А (справочное) Ячейка периодичности композиционного материала. 21
Приложение Б (справочное) Пример согласования типа анизотропии эффективных физико-механических свойств с типом микроструктуры 23
Библиография 24

Введение

Настоящий стандарт определяет основные положения, относящиеся к процессам математического и численного моделирования композиционных материалов (композитов).

Композиты обладают возможностью управления их свойствами, например за счет изменения микроструктуры и выбора свойств составляющих их компонентов, что позволяет создавать высокоэффективные конструкции в различных отраслях промышленности. Текущий уровень развития науки и вычислительной техники позволяет создавать математические и компьютерные 3D-модели композиционных материалов, а также разрабатывать системы инженерного анализа, именуемые по ГОСТ Р 56214 системами автоматического конструирования (computer aided engineering, CAE-системы), с помощью которых осуществляется прогнозирование различных свойств композитов, а затем проводятся детальные расчеты композитных конструкций с использованием 3D-моделей композитов.

Для перехода к численному моделированию свойств и поведения композиционных материалов, в т. ч. в составе изделий из них (деталей, элементов конструкций, конструкций), на основе компьютерных и математических 3D-моделей композитов необходим переход к применению общих 3D-постановок задач механики сплошных сред, применению фундаментальных моделей физико-механических, теплофизических, электромагнитных свойств композитов, с использованием тензорного исчисления и теории тензорной симметрии, специальных математических методов построения моделей, при учете специфических особенностей материаловедения и методов изготовления композиционных материалов и конструкций на их основе.

Для реализации возможности численного 3D-моделирования композиционных материалов на основе нового методического подхода, с существенным использованием механико-математических методов необходимо введение новых терминов и определений, специальной классификации структур, моделей и свойств композиционных материалов с указанием требований к CAE-системам, применяемым для моделирования свойств композитов.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Общие положения

Numerical modeling for polymer composite materials. General provisions

Дата введения — 2026—01—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает общие требования к процессам численного моделирования методом конечных элементов свойств и поведения композиционных материалов путем построения математических и компьютерных 3D-моделей композитов в виде идеализированных периодических структур, образованных из ячеек периодичности, и численного решения уравнений математических моделей.

Построение математических и компьютерных 3D-моделей композитов осуществляется на основе классификации микроструктур, моделей и эффективных свойств композиционных материалов, а также классификаций, применяемых при численном моделировании конечных элементов.

Стандарт распространяется на численное моделирование всех видов композиционных материалов (полимерных, керамических, металлических, углеродных — см. 4.4), в т. ч. в составе изделий из них (деталей, элементов конструкций, конструкций). Следует учитывать, что основные требования настоящего стандарта являются наиболее применимыми для численного моделирования полимерных композиционных материалов (полимерных композитов).

Общие положения, установленные настоящим стандартом, рекомендуются для применения во всех видах документации, в научно-технической, учебной и справочной литературе в области численного моделирования композиционных материалов различного назначения и сфер применения.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 32794 Композиты полимерные. Термины и определения

ГОСТ 33742 Композиты полимерные. Классификация

ГОСТ Р 57188 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения

ГОСТ Р 57412 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения

ГОСТ Р 57700.1 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Требования

ГОСТ Р 57700.2—2017 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения

ГОСТ Р 57700.10 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

Издание официальное

стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная 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, определения и сокращения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 32794, ГОСТ 33742, ГОСТ Р 57188, ГОСТ Р 57412, ГОСТ Р 57700.2, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 Термины, применяемые для численного моделирования и относящиеся к композиционным материалам

3.1.1.1

композит (композитный материал, композиционный материал): Сплошной продукт, состоящий из двух или более материалов, отличных друг от друга по форме, и/или фазовому состоянию, и/или химическому составу, и/или свойствам, скрепленных, как правило, физической связью и имеющих границу раздела между обязательным материалом (матрицей) и ее наполнителями, включая армирующие наполнители.

Примечание — Матрица и наполнитель композита образуют единую структуру и действуют совместно, обеспечивая наилучшим образом необходимые свойства конечного изделия по его функциональному назначению.

[ГОСТ Р 32794—2014, статья 2.1.103]

Примечания

1 Под композиционным материалом (композитом) в настоящем стандарте рассматривается сплошной неоднородный материал, состоящий из двух или более компонентов (материалов), имеющих четкие границы (поверхности) раздела между ними, обладающий новыми свойствами по сравнению со свойствами образующих его компонентов (материалов), и для которого может быть выделен представительный объем (см. [1]—[5]).

2 Материал, состоящий из двух или более слоев различных материалов, соединенных клеевым или иным способом (см. [6], 2.182.2), рассматривается в настоящем стандарте в качестве слоистого композиционного материала.

3.1.1.2 **компоненты [фазы] композиционного материала:** Материалы, образующие структуру композиционного материала, для каждого из которых можно выделить достаточно четко выраженную отдельную геометрическую область

Примечание — См. [1], [3], [4], [7].

3.1.1.3 **поверхность раздела компонентов [фаз] композиционного материала (граница раздела компонентов):** Поверхность, разделяющая компоненты композита, как правило, обладающая самостоятельными свойствами, отличающимися от свойств разделяемых ею компонентов.

Примечания

1 См. [3], [8] ,[9].

2 Для учета поверхности раздела рекомендуется вводить специальную модель либо в виде дополнительного компонента, либо в виде математической модели, заданной на геометрической 2D-поверхности (см. [2], [3]).

3.1.1.4 **матрица композиционного материала:** Один из компонентов композита, соединяющий в единое целое все остальные компоненты композита

Примечания

1 Матрица композиционного материала обеспечивает его цельность, отвечает за передачу и распределение напряжений в армирующем наполнителе и во многом определяет свойства (характеристики) стойкости композита, в т. ч. теплостойкость, влагостойкость, огнестойкость и химическую стойкость.

2 В соответствии с международной классификацией матрицы композиционного материала образуются из полимеров, эластомеров, металлических, керамических, углеродных материалов.

3 Пористость матрицы (весь объем пор) композиционного материала рассматривается для целей численного моделирования как отдельный компонент композиционного материала.

3.1.1.5 **наполнитель композиционного материала:** Любой из компонентов композита, за исключением его матрицы (матриц).

Примечания

1 См. [7], [8].

2 Наполнитель композиционного материала предназначен для придания композиту требуемых свойств и/или для снижения стоимости конечного изделия из композиционного материала.

3 Армирующий наполнитель композиционного материала — наполнитель композиционного материала, предназначенный для улучшения его физико-механических свойств (характеристик).

4 К армирующим наполнителям композиционного материала относятся непрерывные волокна, штапельные или резаные волокна, нити, ровинги, ленты, ткани, маты, различные нетканые материалы, нитевидные монокристаллы, полые и сплошные микросферы и т. д. (армирующий наполнитель не является синонимом термина «наполнитель»).

3.1.1.6 **сотовый наполнитель композиционного материала:** Наполнитель или армирующий наполнитель композиционного материала, обладающий периодической структурой в двух направлениях, подобной структуре пчелиных сот.

3.1.1.7 **представительный элементарный объем композиционного материала;** ПЭО: Минимальный объем композита, используя который можно определить численно и/или экспериментально свойства сплошного однородного материала (среды) с осредненными характеристиками исходных компонентов, эквивалентного рассматриваемому композиционному материалу.

Примечание — Численно осредненные характеристики композитов обычно получают с помощью специальных процедур осреднения свойств исходных компонентов КМ по ЯП или ПЭО (см. [1], [2], [3], [4]).

3.1.1.8 **ячейка периодичности композиционного материала;** ЯП: Представительный объем композита, обладающего свойством периодичности геометрической структуры.

Примечания

1 См. [1].

2 Свойства ячейки периодичности приведены в приложении А.

3.1.1.9 **концентрация компонента композиционного материала:** Относительная объемная доля компонента композиционного материала в ЯП или ПЭО, вычисляемая как отношение объема компонента в ЯП или ПЭО к объему всей ЯП или всего ПЭО.

Примечания

1 См. [1], [3], [5], [12].

2 Для композиционных материалов определяются относительные объемные доли материала матрицы, и/или армирующего наполнителя, и/или пористости.

3.1.2 Термины, применяемые для численного моделирования и относящиеся к микроструктуре композиционных материалов

3.1.2.1 **микроструктура ЯП композиционного материала:** Геометрическая форма всех компонентов композиционного материала в рамках одной ЯП, обычно представляемая как совокупность поверхностей раздела всех компонентов композиционного материала в рамках ЯП и внешней границы ЯП.

3.1.2.2 **непрерывный наполнитель композиционного материала (непрерывный наполнитель):** Наполнитель композиционного материала, для которого существуют пары противоположных граней в ЯП (связанные грани), такие, что любые две точки наполнителя, принадлежащие раздельно этим граням, можно геометрически соединить непрерывной кривой, также принадлежащей этому наполнителю.

Примечание — См. рисунок А.2.

3.1.2.3 **одномерный наполнитель (1D-наполнитель):** Непрерывный наполнитель, для которого существует только одна пара связанных граней в ЯП.

Примечания

1 См. рисунок А.2.

2 К одномерным наполнителям относятся моноволокна, нити, ровинги, жгуты, ленты, кордные ткани.

3.1.2.4 **двухмерный наполнитель (2D-наполнитель):** Непрерывный наполнитель, для которого существуют две пары связанных граней в ЯП.

Примечания

1 См. рисунок А.2.

2 К двухмерным наполнителям относятся ткани (за исключением кордных тканей), нетканые материалы (в частности, мультиаксиальные ткани), трикотажные материалы, материалы сотовой структуры, отдельные слои композита.

3.1.2.5 **трехмерный наполнитель (3D-наполнитель):** Непрерывный наполнитель, для которого все три пары граней в ЯП являются связанными.

Примечания

1 См. рисунок А.2.

2 К трехмерным наполнителям относятся 3D-ткани и другие виды армирующих наполнителей, ориентированные в трех и более направлениях в пространстве (см. [16]).

3.1.2.6 **дискретный наполнитель композиционного материала (дискретный наполнитель, ноль-мерный наполнитель):** Наполнитель композиционного материала, для которого не существует связанных граней ЯП.

Примечание — К ноль-мерным наполнителям относятся наполнители, представляющие собой частицы различной формы: сферической, эллипсоидальной, цилиндрической, полисферической и др., микросферы; рубленые волокна, короткие волокна, хаотически-ориентированные (запутанные) волокна и др. (см. [2], [13]).

3.1.2.7 **композиционный материал с ноль-мерной структурой;** 0D КМ: композиционный материал, ЯП которого содержит только ноль-мерные армирующие наполнители.

Примечания

1 0D КМ состоит из матрицы с дискретными наполнителями в виде частиц различной формы, микросфер; рубленых, коротких, хаотически-ориентированных (запутанных) и других волокон.

2 0D композит, содержащий только дискретные наполнители в форме частиц, все три характерных геометрических размера которых сопоставимы между собой (см. [2], [13]), называют дисперсно-армированным композиционным материалом (ДАКМ).

3.1.2.8 **композиционный материал с одномерной структурой;** 1D КМ: композиционный материал, ЯП которого содержит только одномерные наполнители с одной и той же парой связанных граней ЯП.

Примечания

1 1D КМ состоит из матрицы, армированной непрерывными наполнителями в виде нитей, ровингов, жгутов, лент, кордных тканей, ориентированных в одном и том же направлении (см. [1], [9], [10]).

2 Форма нити (волокна) в ЯП у композиционных материалов с одномерной структурой может быть как идеализированной — в форме кругового цилиндра (цилиндров), так и более сложной, с учетом искривления волокон, обрывов волокон и моделей других дефектов.

3.1.2.9 **композиционный материал с двухмерной структурой;** 2D КМ: композиционный материал, ЯП которого содержит только двухмерные армирующие наполнители с одними и теми же парами связанных граней.

Примечание — Примерами 2D КМ являются:

- слоистые (многослойные) композиционные материалы (СКМ) — КМ, ЯП которых состоит из нескольких различных слоев, матрица также является одним или несколькими слоями);
- слоисто-волокнистые (плоскостно-армированные) композиционные материалы (СВКМ) — СКМ, слои которого содержат нити (волокна), ориентированные под различными углами к одной из выделенных осей, принадлежащей базовой плоскости (см. [5], [12], [14]);
- тканевые композиционные материалы (ТКМ) — КМ, наполнителем которых являются ткани полотняного, саржевого, сатинового и другого плетения;
- мультиаксиальные композиты — КМ, наполнителями которых являются нити, ориентированные в нескольких направлениях одной плоскости, переплетенных дополнительными нитями;
- сотовые материалы — композиты, обладающие периодической структурой в двух направлениях, подобной структуре пчелиных сот.

3.1.2.10 **композиционный материал с трехмерной структурой;** 2,5D КМ, 3D КМ, 4D КМ, 7D КМ, ПАКМ: Композиционный материал, ЯП которого содержит только трехмерные армирующие наполнители.

Примечания

1 3D КМ состоят из матрицы, армированной непрерывными наполнителями в виде 3D-тканей и других видов армирующих наполнителей, ориентированных в трех и более направлениях в пространстве (см. [17]).

2 Примерами композиционных материалов с трехмерной структурой являются композиционные материалы, у которых армирующие наполнители ориентированы: по трем ортогональным направлениям (3D КМ); по четырем диагоналям куба (4D КМ); по трем ортогональным направлениям и четырем диагоналям куба (7D КМ).

3 Тканевые с поперечной прошивкой (пространственно-армированные 3D-тканями многослойные) композиционные материалы относятся к композиционным материалам с трехмерной структурой 2,5D КМ).

3.1.3 Термины, применяемые для численного моделирования и относящиеся к математическим моделям композиционных материалов

3.1.3.1 **тензор:** Инвариантная, т. е. не зависящая от выбора векторного базиса, физическая величина, которая в каждом векторном базисе характеризуется набором координат, обозначаемых специальным образом (рангом тензора n) и преобразующихся при переходе к другому базису умножением соответствующее число n раз на матрицу преобразований базисов.

Примечания

1 См. [19].

2 При численном моделировании композитов наиболее широко применяются: векторы перемещений, скоростей, теплового потока, напряженности электрического поля и др. (тензоры 1-го ранга, $n = 1$); тензоры напряжений, деформации, теплопроводности, теплового расширения, диэлектрической проницаемости и др. (тензоры 2-го ранга, $n = 2$); тензоры пьезоэлектрических, пьезомагнитных модулей и др. (тензоры 3-го ранга, $n = 3$); тензоры модулей упругости, упругих податливостей и др. (тензоры 4-го ранга, $n = 4$).

3.1.3.2 **компонента тензора:** Одна из координат тензора (в т. ч. вектора) в некотором базисе.

3.1.3.3

математическая модель: Модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений.

[ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.1.2]

3.1.3.4 **математическая модель композиционного материала (модель композиционного материала):** Система определяющих соотношений, описывающая свойства или группу свойств композиционного материала как сплошной среды.

Примечание — См. [22].

3.1.3.5 **определяющие соотношения композиционного материала:** Тензорные соотношения между некоторыми основными величинами, определяющие модель композиционного материала как сплошной среды.

Примечания

1 См. [1], [20]—[23].

2 К определяющим соотношениям в настоящем стандарте относятся, в т. ч., следующие соотношения: между тензорами напряжений и деформации; между вектором теплового потока и градиентом температуры; между векторами напряженности электрического поля и электрической индукции; между векторами напряженности магнитного поля и магнитной индукции.

3 В линейной модели среды тензорные определяющие соотношения являются линейными, в нелинейной модели — нелинейными (см. [1], [19], [24]).

3.1.3.6 **эффективные определяющие соотношения композиционного материала:** Определяющие соотношения, описывающие эффективные свойства композиционного материала.

Примечание — См. [1], [3], [4].

3.1.3.7 **модель композиционного материала с эффективными свойствами:** Модель композиционного материала, описывающая его эффективные свойства (см. [1]—[3]).

3.1.3.8 **структурная модель композиционного материала:** Модель композиционного материала, в которой он рассматривается как неоднородный материал, для каждого компонента которого задаются свои определяющие соотношения.

Примечания

1 См. [1]—[3], [5].

2 Обычно структурная модель используется для построения модели композиционного материала с эффективными свойствами и для проведения расчетов эффективных свойств по свойствам компонентов композиционного материала; противоположной является феноменологическая модель композиционного материала, в которой он сразу рассматривается как однородный материал с эффективными свойствами, без учета микроструктуры.

3.1.3.9 **группа симметрии композиционного материала:** Множество преобразований в трехмерном пространстве, состоящее из поворотов вокруг некоторых осей и отражений относительно некоторых плоскостей, образующее математическое понятие группы, такое, что при всех этих преобразованиях не изменяются определяющие соотношения, описывающие различные свойства композиционного материала.

Примечания

1 В соответствии с общепринятой классификацией существует 39 групп симметрии материалов (см. [21], [22], [38]).

2 Для всех групп симметрии в каждом классе симметрии определяющие соотношения, описывающие физико-механические и теплофизические свойства, одинаковы.

3 Определяющие соотношения, описывающие электромагнитомеханические свойства, различны для всех 39 групп (см. [19], [34], [38]—[40]).

3.1.3.10 **класс симметрии [тип анизотропии] композиционного материала (класс симметрии):** Объединение нескольких групп симметрии композиционного материала.

Примечания

1 См. [22], [34], [38]—[40].

2 39 групп симметрии подразделяются на 11 классов симметрии композиционных материалов (см. 5.5.2).

3.1.3.11 **анизотропия свойств композиционного материала:** Зависимость свойств компонентов композиционного материала и композиционного материала от направления в пространстве.

Примечания

1 См. [22], [34], [38]—[40].

2 Понятие анизотропии свойств относится ко всем свойствам композиционных материалов.

3 В моделях композиционных материалов анизотропия свойств учитывается присвоением определяющим соотношениям, описывающим свойства материалов, одного из классов симметрии.

3.1.3.12 **анизотропный композиционный материал:** Композиционный материал, обладающий типом анизотропии (классом симметрии) эффективных свойств, отличным от изотропного.

Примечания

1 См. [1], [2], [22], [39].

2 Существуют трансверсально-изотропные, ортотропные, моноклинные и другие анизотропные материалы.

3.1.4 Термины, применяемые для численного моделирования и относящиеся к физическим процессам и состоянию композиционных материалов

3.1.4.1

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 т. ч. неравномерного поля температур).

[ГОСТ Р 57700.10—2018, пункт 3.16]

3.1.4.2 **напряженно-деформированное состояние композиционного материала:** НДС, возникающее в компонентах композита, в рамках ЯП (или ПЭО), в составе деталей, элементов конструкций и конструкций, возникающих из-за приложения к ним внешних воздействий: механических, тепловых, электромагнитных.

Примечания

1 НДС КМ включает в себя поля перемещений в каждой точке ЯП или ПЭО.

2 НДС КМ определяется в результате решения задачи механики деформируемого твердого тела для ЯП (или ПЭО) и/или для всей конструкции (см. [1], [11], [15], [24], [41]).

3.1.4.3 **тепловое состояние композиционного материала:** Множество полей температур и компонентов вектора теплового потока, действующих в каждой точке компонентов композита, в рамках ЯП или ПЭО, в фиксируемый момент времени, возникающих из-за приложения к композитному элементу конструкции внешних воздействий: тепловых, а также, возможно, механических и электромагнитных.

Примечание — Тепловое состояние КМ определяется в результате решения задачи теплопроводности для ЯП (или ПЭО) и/или для всей конструкции (см. [1], [10], [14], [23], [40]).

3.1.4.4 **электромагнитное состояние композиционного материала:** Множество, состоящее из векторов напряженности электрического и магнитного полей, а также векторов электрической и магнитной индукции, действующих в каждой точке компонентов композита, в рамках ЯП или ПЭО, в фиксируемый момент времени, возникающих из-за приложения к композитному элементу конструкции внешних электромагнитных воздействий, а также, возможно, тепловых и механических воздействий.

Примечание — Электромагнитное состояние КМ определяется в результате решения задачи электродинамики (электромагнитодинамики) для ЯП (или ПЭО) и/или для всей конструкции (см. [2], [21], [22], [24]).

3.1.4.5 **фильтрационное состояние композиционного материала:** Множество, состоящее из поля вектора скорости фильтрации жидкого или газообразного компонента в порах КМ, а также порового давления газов или жидкостей и вектора градиента давления, действующих в каждой точке, в рамках ЯП (или ПЭО), в фиксируемый момент времени, возникающих из-за приложения к пористому композитному элементу конструкции внешних источников воздействий газовой или жидкой среды, и механических, а также, возможно, тепловых и электромагнитных воздействий.

Примечание — Фильтрационное состояние КМ определяется в результате решения задачи фильтрации для ЯП (или ПЭО) и/или для всей конструкции (см. [2], [7], [15]).

3.1.5 Термины, применяемые для численного моделирования и относящиеся к свойствам композиционных материалов

3.1.5.1 **эффективные свойства [характеристики] композиционного материала:** Свойства сплошного однородного материала (среды), эквивалентного рассматриваемому композиционному материалу с осредненными характеристиками исходных компонентов, без учета его микроструктуры.

Примечания

1 См. [1], [3]—[5].

2 Эффективные свойства композитов обычно получают с помощью специальных процедур осреднения свойств исходных компонентов КМ по ЯП или ПЭО, или экспериментально.

3.1.5.2 **динамическая прочность (композиционного материала):** Предельное свойство материала, зависящее от предыстории нагружения (скорости нагружения, длительности нагружения, цикличности и т. п.).

Примечание — См. [36].

3.1.5.3 **диффузия (композиционного материала):** Свойство твердых сред (материалов) пропускать через себя поток газовых, жидких сред или атомов (молекул) других твердых сред, движущийся по молекулярной или кристаллической структуре основного материала (среды).

Примечание — См. [7], [8].

3.1.5.4 **длительная прочность (композиционного материала):** Предельное свойство материалов, которое зависит от длительности нагружения, в т. ч. при постоянных напряжениях, действующих в течение длительного времени.

Примечание — См. [29], [30].

3.1.5.5 **проницаемость (композиционного материала):** Свойство твердых сред (материалов) пропускать через себя поток газовых и/или жидких сред, движущихся по порам материала (среды).

Примечание — См. [7], [8], [15].

3.1.5.6 **статическая прочность (композиционного материала):** Предельное свойство материала, не зависящее от предыстории нагружения, в т. ч. от скорости нагружения, его длительности, цикличности и т. п.

Примечание — См. [5], [10], [13]—[15].

3.1.5.7 **тепловая деформация (композиционного материала):** Деформация, обусловленная только нагревом, не зависящая явно от напряжений.

Примечание — Эффективное свойство материала, описываемое тензорной функцией между тензором деформаций и изменениями температуры (см. [24]).

3.1.5.8 **усталостная прочность (композиционного материала):** Предельное свойство материала, зависящее от циклически изменяющихся напряжений или деформации.

3.1.5.9 **вязкопластические свойства (композиционного материала):** Свойства материалов деформироваться под действием нагрузки необратимым образом при существенной зависимости от скорости нагружения.

Примечание — Модели вязкопластических материалов (сред) представляют собой определяющие соотношения, описываемые нелинейными тензорными функциями между тензорами напряжений, деформации и скоростями их изменений во времени, не меняющимися при переходе от нагрузки к разгрузке (см. [24], [28], [35]).

3.1.5.10 **вязкоупругие свойства (композиционного материала):** Свойства материалов деформироваться под действием нагрузки необратимым образом, т. е. после снятия нагрузки материал не мгновенно и, возможно, не полностью возвращает свою исходную форму, при этом форма материала изменяется с течением времени без изменения нагрузки.

Примечания

1 См. [20], [21], [24], [29], [30].

2 Модели вязкоупругих материалов (сред) представляют собой определяющие соотношения в виде операторов интегрального типа по времени, связывающих тензоры напряжений и деформации.

3.1.5.11 **вязкоупругопластические свойства (композиционного материала):** Свойства вязкоупругости материалов, различающихся при нагрузке и разгрузке.

Примечание — Модель вязкоупругопластических материалов (сред) представляет собой определяющие соотношения в виде тензорных операторов интегрального типа по времени, меняющихся при переходе от нагрузки к разгрузке (см. [28]).

3.1.5.12 **предельные свойства (композиционного материала):** Свойства материалов, превышение которых приводит к разрушению (нарушению целостности) материала.

Примечания

1 См. [37].

2 Для композиционного материала понятие предельных свойств относится ко всей ЯП, достижение предельных свойств в отдельном компоненте композиционного материала или на поверхности раздела компонентов, не приводящее к нарушению целостности всей ЯП, рассматривается только как частичное разрушение, называемое повреждаемостью или деградацией композиционного материала (см. [10], [14]).

3.1.5.13 **связанные электромагнитные и механические свойства (композиционного материала):** Свойства материалов, которым соответствуют модели в виде определяющих соотношений между векторами напряженности электрического и магнитного полей, электрической и магнитной индукции, а также тензорами напряжений и деформации.

Примечания

1 См. [22], [23], [25].

2 Пьезоэлектрические свойства материалов — свойства материалов, которым соответствуют модели в виде определяющих соотношений между вектором электрической индукции и тензором напряжений с одной стороны и вектором напряженности электрического поля и тензором деформации — с другой.

3 Пьезомагнитные свойства материалов — свойства материалов, которым соответствуют модели в виде определяющих соотношений между вектором магнитной индукции и тензором напряжений с одной стороны и вектором напряженности магнитного поля и тензором деформации — с другой.

3.1.5.14 **теплофизические свойства (композиционного материала):** Свойства материалов, которым соответствуют модели в виде определяющих соотношений между тензором деформации, вектором теплового потока, плотностью, внутренней энергией — с одной стороны и температурой, градиентом температуры — с другой, возможно с учетом влияния других воздействующих факторов (старения, влаги, излучения и др.).

Примечание — См. [1], [2], [7], [9].

3.1.5.15 **упругие свойства (композиционного материала):** Свойства материалов деформироваться (изменять форму) под действием нагрузки обратимым образом, т. е. после снятия нагрузки материал мгновенно возвращает свою исходную форму.

Примечания

1 См. [24], [26]—[28].

2 Модели упругих сред представляют собой определяющие соотношения в виде тензорных функций, связывающих тензоры напряжений и деформации.

3.1.5.16 **упруговязкопластические свойства (композиционного материала):** Свойства материалов деформироваться обратимым образом (упруго) под действием нагрузки только до определенного уровня, а выше этого уровня деформироваться необратимым образом, т. е. после снятия нагрузки материал не полностью возвращает свою исходную форму, возникают пластические (остаточные) деформации, при этом упругие и/или пластические деформации существенным образом зависят от скорости нагружения.

Примечание — Модели упруговязкопластических материалов (сред) представляют собой определяющие соотношения в виде нелинейных тензорных функций между тензорами напряжений, деформаций и скоростями их изменений во времени, меняющиеся при переходе от нагрузки к разгрузке (см. [33], [36]).

3.1.5.17 **упругопластические свойства (композиционного материала):** Свойства материалов деформироваться обратимым образом (упруго) под действием нагрузки только до определенного уровня, а выше этого уровня деформироваться необратимым образом, т. е. после снятия нагрузки материал не полностью возвращает свою исходную форму, возникают пластические (остаточные) деформации.

Примечания

1 См. [1], [20], [24], [31], [32].

2 Модели упругопластических материалов (сред) представляют собой определяющие соотношения в виде нелинейных тензорных функций, связывающих тензоры напряжений и деформации, не зависящих явно от времени, но меняющихся при изменении знака приращений напряжений (при нагрузке или разгрузке) (см. [11], [24], [29], [31]—[34]).

3.1.5.18 **физико-механические свойства (композиционного материала):** Свойства материалов (твердых сплошных сред), которым соответствуют модели в виде определяющих соотношений между тензорами напряжений и деформации, возможно, с учетом влияния различных воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

Примечание — См. [2], [7], [9].

3.1.5.19 **электромагнитные свойства (композиционного материала):** Свойства материалов, которым соответствуют модели в виде определяющих соотношений между векторами напряженности электрического и магнитного полей, электрической и магнитной индукции, а также между другими электромагнитными величинами, возможно, с учетом влияния различных воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

Примечание — См. [2], [22]

3.1.6 Термины, относящиеся к компьютерному моделированию

3.1.6.1

валидация ПО КМ: Процесс определения соответствия ПО КМ (компьютерной модели, программы) реальному миру. Валидация обеспечивает обоснование того, что ПО КМ в заявленной области применения позволяет правильно и с определенной точностью моделировать реальные процессы.

[ГОСТ Р 57700.2—2017, пункт 3.1.4]

3.1.6.2

верификация ПО КМ: Процесс определения соответствия ПО КМ (компьютерной модели, программы) математической модели. Верификация обеспечивает обоснование того, что ПО КМ при определенных параметрах рассчитывает математическую модель правильно и с соответствующей точностью.

[ГОСТ Р 57700.2—2017, пункт 3.1.3]

3.1.6.3

компьютерная модель (электронная модель): Модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными.

[ГОСТ Р 57412—2017, пункт 3.1.7]

Примечания

1 В основе компьютерной модели лежит математическая модель, реализованная в виде программного кода, и данные, определяющие конкретный объект моделирования. Для применения компьютерной модели в процессе моделирования необходимо использовать программное обеспечение компьютерного моделирования и вычислительной техники.

2 Под компьютерной моделью в настоящем стандарте понимается компьютерная модель ЯП или ПЭО композиционного материала, содержащая математическую модель КМ, численные алгоритмы решения уравнений математической модели композиционных материалов с граничными условиями, соответствующими модели КМ, а также геометрическая и конечно-элементная модель композиционного материала.

3.1.6.4 **геометрическая модель композиционного материала;** ГМ КМ: Электронная модель ЯП или ПЭО композиционного материала, содержащая необходимые сведения о геометрической форме и размерах всех его компонентов.

3.1.6.5

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 57188—2016, статья 2.3.6]

3.1.6.6

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

[ГОСТ Р 57700.10—2018, пункт 3.8]

Примечание — КЭМ строится не только для конструкций, но и для ПЭО и ЯП композиционных материалов, для моделирования не только НДС, но и других физических процессов и расчета всех эффективных свойств композиционных материалов.

3.1.6.7

программное обеспечение компьютерного моделирования; ПО КМ: Программы, выполняющие математические расчеты, и программы, предназначенные для подготовки исходных данных, обработки результатов расчета, а также другие вспомогательные программы. Программное обеспечение компьютерного моделирования не является программным обеспечением средств измерений согласно ГОСТ Р 8.654.

[ГОСТ Р 57700.2—2017, пункт 3.1.1]

3.1.6.8 **программное обеспечение для численного моделирования композиционных материалов;** ПО ЧМКМ: Программное обеспечение компьютерного моделирования, позволяющее выполнять численное моделирование композиционных материалов.

3.1.6.9 **пользователь ПО ЧМКМ:** Специалист, выполняющий численные исследования композиционных материалов с применением ПО ЧМКМ.

3.1.6.10 **разработчик ПО ЧМКМ:** Юридическое или физическое лицо, разрабатывающее и представляющее к сертификации ПО ЧМКМ.

3.1.6.11

численный метод: Представление математической модели в форме алгоритма, который может быть реализован в виде компьютерной программы.

[ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.2.13]

3.1.6.12

численное моделирование: Моделирование поведения объекта, процесса, явления путем получения численного решения уравнений математической модели.

[ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.2.12]

3.1.6.13 **численное моделирование композиционных материалов:** Моделирование (расчет) эффективных свойств и поведения композиционных материалов, в т. ч. в составе изделий из них

(деталей, элементов конструкций, конструкций), путем получения численного решения уравнений математической модели композиционных материалов с граничными условиями, соответствующими модели КМ.

Примечания

1 Под уравнениями математической модели композиционных материалов в настоящем стандарте понимаются системы уравнений механики сплошных сред для ЯП КМ с определяющими соотношениями компонентов КМ.

2 В качестве системы уравнений механики сплошных сред, при моделировании композиционных материалов обычно рассматриваются: уравнения механики деформируемого твердого тела, уравнения теплопроводности, уравнения электродинамики (электромагнитодинамики), уравнения фильтрации и другие (см. [1], [2], [3], [11], [15], [22]).

3.2 Сокращения

КЭ — конечный элемент;

ПАКМ — пространственно-армированный композиционный материал;

СВКМ — слоисто-волокнистый композиционный материал;

СКМ — слоистый композиционный материал;

ТКМ — тканевый композиционный материал.

4 Общие положения

4.1 Задачи численного моделирования композиционных материалов

Численное моделирование композиционных материалов выполняется для решения различных задач следующими лицами:

- пользователями ПО ЧМКМ;
- разработчиками ПО ЧМКМ.

4.1.1 Пользователи ПО ЧМКМ выполняют моделирование композиционных материалов для решения следующих основных задач:

- исследование и/или прогнозирование свойств композиционных материалов на основе исходной информации о свойствах составляющих их компонентов и геометрии микроструктуры и/или свойствах элементов микроструктуры (монослоев многослойного композиционного материала) и геометрии микроструктуры;
- верификация (подтверждение достоверности) численных решений задач механики сплошной среды, получаемых методом конечных элементов, и валидация примененных и/или разработанных математических и/или компьютерных моделей композиционных материалов и их определяющих соотношений для физико-механических, физико-химических и иных процессов;
- разработка и сдача в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий из композиционных материалов и/или с применением конструкций и/или элементов конструкций из композиционных материалов.

4.1.2 Разработчики ПО ЧМКМ выполняют моделирование композиционных материалов для решения следующих основных задач:

- разработка ПО, обеспечивающего возможность адекватного численного моделирования композиционных материалов, включая возможность расчета эффективных свойств композиционных материалов;
- доработка и обновление ранее разработанного ПО, обеспечивающего возможность адекватного численного моделирования композиционных материалов;
- верификация и валидация разработанного или доработанного ПО, обеспечивающего возможность адекватного численного моделирования композиционных материалов.

4.2 Уровни численного моделирования композиционных материалов

Численное моделирование композиционных материалов выполняется на микроуровне и макроуровне.

4.2.1 На микроуровне рассматриваются и моделируются свойства композиционных материалов (включая монослои многослойных композиционных материалов) на основе исходной информации о свойствах составляющих их компонентов и геометрии микроструктуры.

Для моделирования некоторых типов композитов выделяют несколько иерархически вложенных микроуровней, каждый из которых имеет свои ЯП.

4.2.2 На макроуровне рассматриваются изделия из композиционных материалов и/или с применением конструкций и/или элементов конструкций из композиционных материалов и моделируется поведение композиционных материалов в составе изделий (деталей, конструкций и/или элементов конструкций) в зависимости от свойств композиционных материалов и требований, предъявляемых к изделиям по их функциональному назначению.

4.3 ПО КМ для численного моделирования композиционных материалов (ПО ЧМКМ)

ПО ЧМКМ должно соответствовать следующим требованиям:

1) ПО должно реализовывать компьютерное (численное) моделирование физических процессов механики сплошной среды на основе метода конечных элементов;

2) ПО должно быть верифицировано и валидировано в соответствии с ГОСТ Р 57700.1 и ГОСТ Р 57700.2—2017 (4.6.1 — для верификации, 4.6.2 — для валидации);

3) верифицированное ПО должно обеспечивать возможность адекватного численного моделирования композиционных материалов;

4) верифицированное и валидированное ПО должно обеспечивать возможность разработки КЭМ, соответствующей общим требованиям к обеспечению качества КЭМ по 5.8.3.3.

4.4 Композиционные материалы, моделируемые в ПО ЧМКМ

ПО ЧМКМ предназначено для численного моделирования композиционных материалов, классифицируемых по следующим основным признакам:

- по типу материала матрицы композита;
- по типу микроструктуры композита;
- по типу тензорной симметрии эффективных свойств композита.

4.4.1 По типу материала матрицы композиты подразделяют:

- на композиты с полимерной матрицей;
- композиты с керамической матрицей;
- композиты с металлической матрицей;
- композиты с углеродной матрицей;
- композиты с гибридной матрицей.

4.4.1.1 Композиты с полимерной матрицей (полимерные композиционные материалы, ПКМ) представляют собой материалы, матрица которых образована термопластичными или термореактивными материалами или эластомерами и наполнена различными видами армирующих наполнителей из различных типов химических и/или натуральных непрерывных и/или дискретных волокон (штапельных или рубленых) и/или иных дискретных наполнителей в виде частиц различной формы (порошков, гранул, микросфер и др.).

4.4.1.2 Композиты с керамической матрицей (керамические композиционные материалы, ККМ) представляют собой материалы, матрица которых образована керамическими материалами и наполнена различными видами армирующих наполнителей из различных типов химических непрерывных или дискретных волокон (штапельных или рубленых) и/или иных дискретных наполнителей в виде частиц различной формы (порошков, гранул и др.).

4.4.1.3 Композиты с металлической матрицей (металлические композиционные материалы, МКМ) представляют собой материалы, матрица которых образована металлическими материалами (металлы, сплавы) и наполнена различными видами армирующих наполнителей из различных типов химических непрерывных или дискретных волокон (штапельных или рубленых) и/или иных дискретных наполнителей в виде частиц различной формы (порошков, гранул и др.).

4.4.1.4 Композиты с углеродной матрицей (углеродные композиционные материалы, УКМ) представляют собой материалы, матрица которых образована углеродными материалами и наполнена различными видами армирующих наполнителей из различных типов химических непрерывных или дискретных волокон (штапельных или рубленых) и/или иных дискретных наполнителей в виде частиц различной формы (порошков, гранул и др.).

4.4.1.5 Композиты с гибридной матрицей (гибридные композиционные материалы, ГКМ) представляют собой материалы, матрица которых образована одновременно материалами различной природы в различных сочетаниях (полимеры, керамики, металлы, углеродные материалы) и наполнена различ-

ными видами армирующих наполнителей из различных типов химических непрерывных или дискретных волокон (штапельных или рубленых) и/или иных дискретных наполнителей в виде частиц различной формы (порошков, гранул и др.).

4.4.2 По типу микроструктуры композиты подразделяют:

- на композиционные материалы с ноль-мерной структурой, 0D КМ (см. 3.1.2.7);
- композиционные материалы с одномерной структурой, 1D КМ (см. 3.1.2.8);
- композиционные материалы с двухмерной структурой, 2D КМ (см. 3.1.2.9);
- композиционные материалы с трехмерной структурой, 2,5D КМ, 3D КМ, 4D КМ, 7D КМ (см. 3.1.2.10).

4.4.3 По типу тензорной симметрии эффективных свойств композиты подразделяют:

- на изотропные композиционные материалы;
- трансверсально-изотропные композиционные материалы;
- квазиизотропные композиционные материалы (композиционные материалы с кубическим классом симметрии эффективных свойств);
- гексагональные композиционные материалы (композиционные материалы с гексагональным классом симметрии эффективных свойств);
- А-ромбоэдрические композиционные материалы (композиционные материалы с А-ромбоэдрическим классом симметрии эффективных свойств);
- В-ромбоэдрические композиционные материалы (композиционные материалы с В-ромбоэдрическим классом симметрии эффективных свойств);
- тетрагональные композиционные материалы (композиционные материалы с тетрагональным классом симметрии эффективных свойств);
- квази-трансверсально-изотропные композиционные материалы;
- ортотропные композиционные материалы (композиционные материалы с ромбическим классом симметрии эффективных свойств);
- моноклинные композиционные материалы (композиционные материалы с моноклинным классом симметрии эффективных свойств);
- композиционные материалы с анизотропией общего вида (композиционные материалы с триклинным классом симметрии эффективных свойств).

4.5 Свойства композиционных материалов, моделируемых в ПО ЧМКМ, и их модели

При численном моделировании композиционных материалов рассматриваются следующие основные свойства и их модели:

- физико-механические;
- теплофизические;
- физико-химические;
- электромагнитные.

Примечание — Допускается моделирование в ПО ЧМКМ иных, в т. ч. связанных, свойств композиционных материалов.

4.5.1 Деформативные свойства композиционных материалов и их модели

4.5.1.1 Упругие свойства композиционных материалов

Для упругих свойств существуют следующие модели и их характеристики:

а) модель линейно-упругой среды:

1) тензор модулей упругости;

2) тензор упругих податливостей (обратный к тензору модулей упругости);

3) технические упругие константы (модули упругости, модули сдвига, коэффициенты Пуассона и др.);

4) технические упругие константы с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.);

б) модель нелинейно-упругой среды:

1) соотношения между инвариантами тензоров напряжений и деформаций;

2) соотношения между инвариантами тензоров напряжений и деформаций с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др).

4.5.1.2 Вязкоупругие свойства композиционных материалов

Для вязкоупругих свойств существуют следующие основные модели и их характеристики:

а) модель линейно-вязкоупругой среды:

1) тензоры ядер релаксации и функций релаксации;

2) тензоры ядер ползучести и функций ползучести;

3) тензоры ядер релаксации и функций релаксации с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.);

4) тензоры ядер ползучести и функций ползучести с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.);

б) модель линейно-вязкоупругой среды при гармонических колебаниях:

1) тензор комплексных модулей упругости;

2) тензор комплексных упругих податливостей (обратный к тензору комплексных модулей упругости);

3) технические комплексные упругие константы (комплексные модули упругости, модули сдвига, коэффициенты Пуассона и др.);

4) технические комплексные упругие константы с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.);

в) модель нелинейно-вязкоупругой среды:

1) функции, описывающие зависимость ядер релаксации и функций релаксации от инвариантов тензоров деформации (главные теории нелинейной вязкоупругости);

2) функции, описывающие зависимость ядер ползучести и функций ползучести от инвариантов тензоров напряжений деформации (главные теории нелинейной вязкоупругости);

3) функции, описывающие зависимость ядер релаксации и функций релаксации от инвариантов тензоров деформации с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.);

4) функции, описывающие зависимость ядер ползучести и функций ползучести от инвариантов тензоров напряжений деформации с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.1.3 Упругопластические свойства композиционных материалов

Для упругопластических свойств существуют следующие основные модели и их характеристики:

а) деформационная модель упругопластической среды:

1) тензор модулей упругости, условия начала пластичности;

2) соотношения между инвариантами тензоров напряжений и деформаций в области пластичности, условия разгрузки;

3) тензор модулей упругости, условия начала пластичности, соотношения между инвариантами тензоров напряжений и деформаций в области пластичности, условия разгрузки с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.);

б) модель теории течения:

1) тензор модулей упругости;

2) уравнения поверхности пластичности;

3) условия начала пластичности, условия активного и пассивного нагружения;

4) ассоциированный закон пластичности (закон градиентальности);

5) тензор модулей упругости, уравнения поверхности пластичности с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.);

в) модель упругопластической среды при малоцикловом нагружении:

1) тензор модулей упругости, условия начала пластичности в зависимости от цикла нагружения;

2) соотношения между инвариантами тензоров напряжений и деформаций в области пластичности в зависимости от цикла нагружения, условия разгрузки;

3) тензор модулей упругости, условия начала пластичности, соотношения между инвариантами тензоров напряжений и деформаций в области пластичности, условия разгрузки с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.1.4 Вязкопластические свойства композиционных материалов

Модель вязкопластической среды со следующими характеристиками:

1) соотношения между инвариантами тензоров напряжений, деформаций, а также между их скоростями;

2) соотношения между инвариантами тензоров напряжений, деформаций, а также между их скоростями с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.1.5 Вязкоупругопластические свойства композиционных материалов

Модель вязкоупругопластической среды со следующими характеристиками:

1) тензор модулей упругости;

2) уравнения поверхности пластичности, зависящие от тензоров скоростей напряжений и деформации;

3) условия начала пластичности, условия активного и пассивного нагружения;

4) ассоциированный закон пластичности;

5) тензор модулей упругости, уравнения поверхности пластичности с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.1.6 Другие физико-механические свойства композиционных материалов

Физико-механические свойства композиционных материалов, отличающиеся от упругих свойств (5.6.1.1), относятся к неупругим свойствам композиционных материалов.

4.5.2 Предельные (прочностные) свойства композиционных материалов и их модели

4.5.2.1 Статическая прочность композиционных материалов

Модели статической прочности со следующими характеристиками:

1) константы (пределы) прочности (при растяжении, сдвиге, сжатии);

2) константы (пределы) прочности с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.);

3) критерии прочности (уравнения, определяющие условия разрушения материала);

4) критерии прочности с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.2.2 Динамическая прочность композиционных материалов

Модели динамической прочности со следующими характеристиками:

1) зависимости пределов прочности от скорости деформации, скорости изменения напряжений;

2) зависимости параметров повреждаемости, описывающих уровень достигнутого предельного состояния, от напряжений, скорости деформации и от предыстории изменения напряжений;

3) зависимости параметров повреждаемости от напряжений, скорости деформации и от предыстории изменения напряжений с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.2.3 Длительная и усталостная прочность композиционных материалов

Для длительной и усталостной прочности существуют следующие основные модели и их характеристики:

а) модели длительной прочности при постоянных нагрузках:

1) функции, описывающие модель длительной прочности, в т. ч. ядра повреждаемости (при растяжении, сдвиге, сжатии и др.);

2) функции, учитывающие влияние воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.) на длительную прочность;

б) модели усталостной прочности при малоцикловом нагружении:

1) прочность при малоцикловом нагружении без учета воздействующих факторов;

2) прочность при малоцикловом нагружении с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.);

в) модели усталостной прочности при многоцикловом нагружении:

1) прочность при многоцикловом нагружении без учета воздействующих факторов;

2) прочность при многоцикловом нагружении с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.2.4 Межслоевая трещиностойкость (вязкость разрушения) композиционных материалов

Для трещиностойкости существуют следующие основные модели и их характеристики:

а) модели распространения трещин:

- коэффициенты трещиностойкости (коэффициенты интенсивности напряжений);
- J-интеграл;
- коэффициенты в нелинейных моделях распространения трещин;

б) модели распространения усталостных трещин:

- коэффициенты в моделях распространения усталостных трещин.

4.5.3 Теплофизические свойства композиционных материалов и их модели

4.5.3.1 Плотность. Модели изменения плотности композиционных материалов

Модели изменения плотности композиционных материалов со следующими характеристиками:

1) плотность без учета воздействующих факторов;

2) константы в модели изменения плотности при нагреве;

3) в модели изменения плотности с учетом воздействующих факторов (старения, влаги, излучения и др.).

4.5.3.2 Удельная теплоемкость. Модели изменения теплоемкости композиционных материалов

Модели изменения теплоемкости композиционных материалов со следующими характеристиками:

1) удельная теплоемкость без учета воздействующих факторов;

2) константы в модели изменения удельной теплоемкости при нагреве;

3) константы в модели изменения удельной теплоемкости с учетом воздействующих факторов (старения, влаги, излучения и др.).

4.5.3.3 Теплопроводность. Модель теплопроводности композиционных материалов

Модель теплопроводности композиционных материалов со следующими характеристиками:

1) тензор теплопроводности без учета воздействующих факторов;

2) тензор теплопроводности с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.3.4 Тепловая деформация. Модели теплового расширения композиционных материалов

Модели теплового расширения композиционных материалов со следующими характеристиками:

1) тензор теплового расширения без учета воздействующих факторов;

2) тензор теплового расширения с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.4 Физико-химические свойства композиционных материалов и их модели

4.5.4.1 Диффузия. Модели диффузии композиционных материалов

Модели диффузии композиционных материалов со следующими характеристиками:

1) тензор коэффициентов диффузии без учета воздействующих факторов;

2) тензор коэффициентов диффузии с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.4.2 Проницаемость. Модели проницаемости композиционных материалов

Модели проницаемости композиционных материалов со следующими характеристиками:

1) тензор проницаемости без учета воздействующих факторов;

2) тензор проницаемости с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.5 Электромагнитные свойства композиционных материалов и их модели

4.5.5.1 Диэлектрическая проницаемость. Модели диэлектрической проницаемости композиционных материалов

Модели диэлектрической проницаемости со следующими характеристиками:

1) тензор диэлектрической проницаемости без учета воздействующих факторов;

2) тензор диэлектрической проницаемости с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.5.2 Модель комплексной диэлектрической проницаемости композиционных материалов при гармонических колебаниях

Модель комплексной диэлектрической проницаемости композиционных материалов при гармонических колебаниях со следующими характеристиками:

1) тензор комплексной диэлектрической проницаемости без учета воздействующих факторов;

2) тензор комплексной диэлектрической проницаемости с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.5.3 Модель среды с нелинейными диэлектрическими свойствами

Модель среды с нелинейными диэлектрическими свойствами со следующими характеристиками:

1) соотношения между инвариантами векторов напряженности электрического поля и электрической индукции без учета воздействующих факторов;

2) соотношения между инвариантами векторов напряженности электрического поля и электрической индукции с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.5.4 Магнитная проницаемость. Модели магнитной проницаемости композиционных материалов

Модели магнитной проницаемости со следующими характеристиками:

1) тензор магнитной проницаемости без учета воздействующих факторов;

2) тензор магнитной проницаемости с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.5.5 Модель комплексной магнитной проницаемости композиционных материалов при гармонических колебаниях

Модель комплексной магнитной проницаемости композиционных материалов при гармонических колебаниях со следующими характеристиками:

1) тензор комплексной магнитной проницаемости без учета воздействующих факторов;

2) тензор комплексной магнитной проницаемости с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.5.6 Модель среды с нелинейными магнитными свойствами

Модель среды с нелинейными магнитными свойствами со следующими характеристиками:

1) соотношения между инвариантами векторов напряженности магнитного поля и магнитной индукции без учета воздействующих факторов;

2) соотношения между инвариантами векторов напряженности электрического поля и электрической индукции с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.5.7 Электропроводность. Модели электропроводности композиционных материалов

Модели электропроводности композиционных материалов со следующими характеристиками:

1) тензор электропроводности без учета воздействующих факторов;

2) тензор электропроводности с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, излучения и др.).

4.5.5.8 Связанные электромагнитные и механические свойства. Пьезоэлектрические свойства композиционных материалов

Модель линейной электроупругой среды со следующими характеристиками:

1) тензор пьезоэлектрических модулей, тензор модулей упругости, тензор диэлектрической проницаемости без учета воздействующих факторов;

2) тензор пьезоэлектрических модулей, тензор модулей упругости, тензор диэлектрической проницаемости с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.5.9 Пьезомагнитные свойства композиционных материалов

Модель линейной магнитоупругой среды со следующими характеристиками:

1) тензор пьезомагнитных модулей, тензор модулей упругости, тензор магнитной проницаемости без учета воздействующих факторов;

2) тензор пьезомагнитных модулей, тензор модулей упругости, тензор магнитной проницаемости с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.5.5.10 Электромагнитные и упругие свойства композиционных материалов

Модель электромагнитоупругой среды со следующими характеристиками:

1) тензор пьезоэлектрических модулей, тензор пьезомагнитных модулей, тензор модулей упругости, тензор диэлектрической проницаемости, тензор магнитной проницаемости, тензор магнитоэлектрических модулей без учета воздействующих факторов;

2) тензор пьезоэлектрических модулей, тензор пьезомагнитных модулей, тензор модулей упругости, тензор диэлектрической проницаемости, тензор магнитной проницаемости с учетом воздействующих факторов (температуры, старения, влаги, излучения и др.).

4.6 КЭ для численного моделирования композиционных материалов

КЭ для численного моделирования композиционных материалов классифицируют по следующим основным признакам:

- по типу КЭ;
- по порядку КЭ;
- по типу границ КЭ;
- по типу аппроксимации КЭ;
- по типу интегрирования КЭ.

4.6.1 По типу КЭ подразделяются:

- на тетраэдральные КЭ;
- гексагональные КЭ;
- призматические КЭ;
- гибридные КЭ.

4.6.2 По порядку КЭ подразделяются:

- на КЭ 1-го порядка;
- КЭ 2-го порядка;
- КЭ более высокого порядка.

4.6.3 По типу границ КЭ подразделяются:
- на КЭ с прямолинейными границами;
- КЭ с криволинейными границами.

4.6.3.1 КЭ с криволинейными границами подразделяются:
- на изопараметрические КЭ;
- субпараметрические КЭ;
- суперпараметрические КЭ.

4.6.4 По типу аппроксимации КЭ подразделяются:
- на КЭ с линейной аппроксимацией;
- КЭ с квадратичной аппроксимацией;
- КЭ с полиномиальной аппроксимацией более высокого порядка;
- КЭ с гладкой неполиномиальной аппроксимацией;
- КЭ с негладкой аппроксимацией;
- КЭ с сингулярной аппроксимацией.

4.6.5 По типу интегрирования КЭ подразделяются:
- на КЭ с полным интегрированием в КЭ;
- КЭ с неполным (сокращенным) интегрированием в КЭ.

4.7 Последовательность проведения численного моделирования композиционных материалов

4.7.1 Численное моделированиекомпозиционных материалов состоит из следующих последовательных этапов:

1) Выбор и обоснование применения ПОЧМКМ, обеспечивающего возможность адекватного численного моделирования композиционных материалов.
2) Постановка задачи.
3) Выбор моделей композиционных материалов.
4) Разработка геометрических моделей композиционных материалов.
5) Разработка КЭМЯП или ПЭО.
6) Расчет свойств и поведения композиционных материалов с использованием ПО ЧМКМ.
7) Анализ и оценка адекватности результатов расчетов.
8) Модификация математических и/или компьютерных моделей по результатам расчета (если есть необходимость).

Общий алгоритм проведения численного моделирования методом конечных элементов композиционных материалов, в т. ч. в составе изделий из них (деталей, элементов конструкций, конструкций) на основе компьютерных и математических 3D-моделей композитов, представляющих собой ПЭО или ЯП, приведен на рисунке 1.

Примечание — Рекомендуемая последовательность действий при численном моделировании напряженно-деформированного состояния сложных элементов конструкций из композиционных материалов и/или с применением конструкций и/или элементов конструкций из композиционных материалов — по ГОСТ Р 57700.10.



Рисунок 1 — Общий алгоритм проведения численного моделирования

4.7.2 Выбор и обоснование применения ПО ЧМКМ

ПО ЧМКМ должно соответствовать 4.3.

4.7.3 Постановка задачи

Постановка задачи включает в себя:

- выбор решаемой задачи в соответствии с 4.1;
- основные допущения, которые делаются в процессе идеализации реального объекта для проведения численного моделирования;
- выбор моделируемого композиционного материала в соответствии с классификацией, приведенной в 4.4;
- выбор свойств моделируемых композиционных материалов в соответствии с классификацией, приведенной в 4.5;
- выбор моделей свойств композиционных материалов и их компонентов в соответствии с классификацией, приведенной в 4.5;
- геометрические характеристики сечений и размеров;
- сведения по нагрузкам и закреплениям.

4.7.4 Разработка геометрических моделей композиционных материалов

При разработке ГМ КМ следует соблюдать следующие рекомендации, требования и допущения:

- рекомендуется выбирать геометрические модели ЯП композиционного материала из базы моделей ЯП ПО ЧМКМ (в случае, если данная база является составной частью ПО ЧМКМ);
- геометрическая модель ЯП композиционного материала должна быть предварительно проверена на наличие дефектов, прежде всего для наполнителей композиционного материала: поверхностей с острыми углами, объемов существенно меньшего размера по сравнению с габаритами ЯП, разрывов в непрерывности и т. д. При наличии указанных дефектов должна быть проведена коррекция геометрической модели;
- допускается упрощение геометрической модели для ускорения генерации сетки (например, выполнение операций по удалению локальных искривлений поверхностей наполнителей), за исключением задач расчета предельных свойств композиционных материалов. Рекомендуется проведение сравнительных расчетов при принятии решений по упрощению геометрической модели;
- для построения КЭМ надлежащего качества над геометрическими моделями помимо коррекции и упрощения должны быть проведены действия по проверке твердотельной модели на наличие сдвоенных поверхностей.

4.7.5 Разработка КЭМ

4.7.5.1 Разработка КЭМ включает в себя:

- выбор типов КЭ в соответствии с классификацией, приведенной в 4.6, и возможностями выбранного ПО ЧМКМ;
- создание сетки конечных элементов.

4.7.5.2 Общие требования к обеспечению качества КЭМ

1) При разработке КЭМ для проведения численного моделирования композиционных материалов необходимо придерживаться следующих рекомендаций и допущений:

- рекомендуется разрабатывать КЭМ с числом элементов между компонентами композиционного материала по нормали к их поверхностям менее 3;
- рекомендуется при разработке КЭМ использовать КЭ второго порядка (с промежуточными узлами);
- рекомендуется при разработке КЭМ (для корректного учета взаимодействия компонентов композиционного материала) моделировать поверхность раздела между компонентами композиционного материала как отдельный компонент;
- для решения задач расчета прочностных свойств композиционных материалов не рекомендуется использовать треугольные и тетраэдральные КЭ первого порядка при проведении численного моделирования в 2D- и 3D-постановках соответственно;
- допускается использование КЭ невысокого качества для ЯП компонентов композиционного материала, в которых заведомо не достигаются предельные свойства этих компонентов.

2) Для оценки качества разработанной КЭМ необходимоиспользовать следующие критерии:

- критерии, основанные на геометрическом совершенстве КЭ (см. ГОСТ Р 57700.10);
- критерии, основанные на исследовании зависимости напряжений от количества элементов в КЭМ.

Примечания

1 Исследование зависимости напряжений от количества элементов в КЭМ состоит в проведении последовательных расчетов с разным числом КЭ и выборе той КЭМ, для которой величина напряжений не меняется более, чем на величину, определенную требованиями к точности расчетов.

2 Применение каждого из перечисленных критериев является необходимым, но не достаточным условием разработки КЭМ высокого качества.

3 Для повышения оценки качества КЭМ допускается использование дополнительных критериев, определяемых по взаимному согласованию сторон, исполнителем и/или заказчиком работ по численному моделированию композиционных материалов.

4.7.6 Расчет с использованием ПО ЧМКМ

4.7.6.1 Расчет свойств композиционных материалов с использованием ПО ЧМКМ включает в себя:

- задание свойств компонентов КМ для геометрических областей, соответствующих им в ПЭО или ЯП.

Примечание — Ввод характеристик (свойств) компонентов композиционного материала рекомендуется осуществлять из базы констант моделей компонентов (в случае, если данная база является составной частью ПО ЧМКМ;

- задание граничных условий (ГУ) для расчета свойств КМ согласно выбранной математической модели КМ и ее реализации в ПО ЧМКМ;
- решение задач на ЯП и прогнозирование свойств КМ с применением ПО ЧМКМ.

4.7.6.2 При расчете прогнозируемых эффективных свойств композиционных материалов выбранный тип анизотропии КМ должен быть согласован с соответствующим типом микроструктуры.

Примечания

1 Согласование может осуществляться вручную в рамках доступного функционала ПО ЧМКМ, или автоматизированно/полуавтоматизированно.

2 Пример согласования типа анизотропии эффективных свойств композиционных материалов с типом микроструктуры для физико-механических свойств КМ приведен в таблице Б.1 (приложение Б).

3 Для электромагнитных свойств согласование типа анизотропии композиционного материала с типом микроструктуры должно проводиться на основе функционала ПО ЧМКМ или на основе документально подтвержденных и верифицированных результатов научных исследований.

4.7.6.3 Для сокращения времени расчетов допускается использование моделей меньшей размерности, если это допускается постановкой задачи (например, 2D вместо 3D для однонаправленно-армированных композиционных материалов).

4.7.7 Анализ и оценка адекватности результатов расчетов

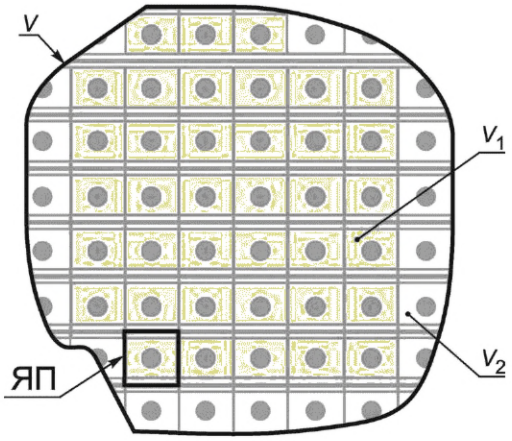
После проведения расчетов должен быть проведен критический анализ (анализ полученных результатов в соответствии с задачами моделирования в соответствии с 4.1 и обработка полученных результатов).

4.7.8 При численном моделировании композиционных материалов в соответствии с задачами моделирования по 4.1 допускается реализация иной последовательности проведения данного процесса при соблюдении требований настоящего стандарта.

Приложение А
(справочное)

Ячейка периодичности композиционного материала

А.1 На рисунке 1 приведены пояснения к понятию «ячейка периодичности композиционного материала».



V — область всего композиционного материала (изделия из композиционного материала); ЯП — ячейка периодичности;
V_1 — часть области V композиционного материала, составленная из ЯП параллельным их переносом в пространстве;
V_2 — часть области V композиционного материала, прилегающая к его границе, которая не может быть образована параллельным переносом ЯП

Рисунок А.1

А.2 Свойства ячейки периодичности

А.2.1 ЯП [1] обладает следующими свойствами:

1) параллельные переносы ЯП в 1-м, 2-х или 3-х координатных направлениях позволяют заполнить всю область V композита, за исключением, возможно, частей, прилегающих к границе области V в соответствии с рисунком А.1;

2) ЯП содержит в себе части всех компонентов КМ;

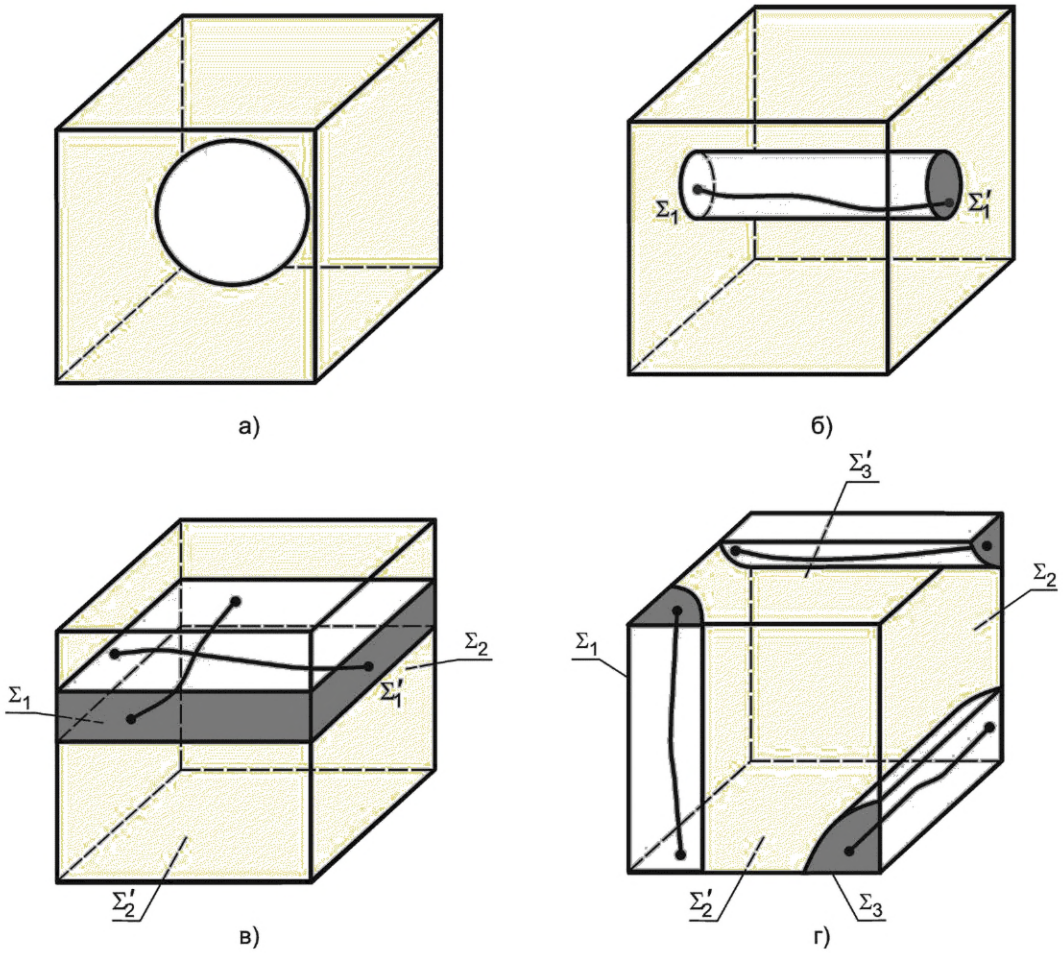
3) ЯП обладает всеми свойствами симметрии (классом симметрии в трехмерном пространстве), что и композит в целом;

4) композиты с периодической структурой состоят из большого числа ЯП.

А.2.2 Периодическая структура с наличием ЯП является идеализированной моделью геометрической структуры реальных КМ, для учета случайных свойств реальных КМ может применяться модель ЯП со случайным расположением компонентов или общая модель ПЭО без допущения о периодичности (см. [11]).

А.3 Непрерывный наполнитель в ЯП композиционного материала

На рисунке 2 приведены пояснения к понятию «непрерывный наполнитель в ЯП композиционного материала» (непрерывный наполнитель, не ноль-мерный наполнитель).



а) ноль-мерный наполнитель; б) одномерный наполнитель; в) двумерный наполнитель; г) трехмерный наполнитель

Рисунок А.2

Примечание — Обозначения $\sum_1$, $\sum_1'$; $\sum_2$, $\sum_2'$ и $\sum_3$, $\sum_3'$ относятся к противоположным (связанным) парам граней ЯП для разных типов наполнителей (для наполнителей показаны пары точек на связанных гранях и непрерывные кривые, соединяющие их).

Приложение Б
(справочное)

Пример согласования типа анизотропии эффективных физико-механических свойств с типом микроструктуры

Таблица Б.1 — Пример согласования типа анизотропии эффективных свойств композиционных материалов

Микроструктура КМ	Тип анизотропии (класс симметрии) эффективных свойств КМ						
	Изотропия	Трансверсальная изотропия	Квазиизотропия	Квазитрансверсальная изотропия	Ортотропия	Моноклинная симметрия	Анизотропия общего вида
0D КМ							
1D КМ							
2D КМ							
СКМ							
СВКМ							
ТКМ							
2,5D КМ							
3D, 4D, 7D							
Примечание — Для некоторых типов микроструктур возможны несколько различных типов анизотропии в зависимости от конкретной реализации микроструктуры.							

Библиография

[1] Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. — М.: Изд-во МГУ, 1984. — 352 с.

[2] Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов. — Киев: Наукова думка, 1985. — 304 с.

[3] Кристенсен Р.М. Введение в механику композитов. — М.: Мир, 1982. — 336 с.

[4] Сендецки Д. Механика композиционных материалов. — М.: Мир, 1978. — 564 с.

[5] Jones R.M. Mechanics of Composite materials. 2-d edition. — Taylor&Francis,1999. — 519 p.

[6] ISO 472:2013 Plastics — Vocabulary (ИСО 472:2013 Пластмассы. Словарь)

[7] Берлин А.А. и др. Принципы создания композиционных полимерных материалов. — М.: Химия, 1990. — 240 с.

[8] Любин Дж. Справочник по композиционным материалам. В 2-х книгах. — М.: Машиностроение, 1988. — 446 с.

[9] Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. — М.: Химия, 1981. — 232 с.

[10] Васильев В.В. и др. Композиционные материалы: Справочник. — М.: Машиностроение, 1990. — 512 с.

[11] Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. — М.: Физматлит, 1997. — 288 с.

[12] Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. — М.: Машиностроение, 1988. — 270 с.

[13] Вишняков Л.Р. и др. Композиционные материалы: Справочник — Киев: Наукова думка, 1985. — 592 с.

[14] Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. — М.: Машиностроение, 1984. — 264 с.

[15] Димитриенко Ю.И. Механика композиционных материалов при высоких температурах. — М.: Машиностроение, 1997. — 366 с.

[16] Скардино Ф., Хирл Дж., Кавабата С. и др. Тканые конструкционные композиты. — М.: Мир, 1990. — 432 с.

[17] Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы. — М.: Машиностроение, 1987. — 224 с.

[18] Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р Жаропрочность никелевых сплавов. — М.: Машиностроение, 1998. — 463 с.

[19] Димитриенко Ю.И. Тензорный анализ. Механика сплошной среды. Т.1. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. — 463 с.

[20] Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. — М.: Изд-во МГУ, 1990. — 310 с.

[21] Труселл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред. — М.: Мир, 1975. — 592 с.

[22] Димитриенко Ю.И. Универсальные законы механики и электродинамики сплошной среды. Механика сплошной среды. Т.2. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. — 560 с.

[23] Можен Ж. Механика электромагнитных сплошных сред. — М.: Мир,1991. — 560 с.

[24] Димитриенко Ю.И. Основы механики твердого тела. Механика сплошной среды. Т.4. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. — 624 с.

[25] Новацкий В. Электромагнитные эффекты в твердых телах.— М.: Мир, 1986. —160 с.

[26] Новацкий В. Теория упругости. — М.: Мир, 1975. — 872 с.

[27] Лурье А.И. Теория упругости. — М.: Наука, 1970. — 940 с.

[28] Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности. — М.: Физматлит, 2002. — 416 с.

[29] Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. — М.: Наука, 1970. — 282 с.

[30] Гольдман А.Я. Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов. — Л.: Химия, 1988. — 272 с.

[31] Ильюшин А.А. Пластичность. Ч.1 Упруго-пластические деформации. — М.—Л.: Гостехиздат, 1948. — 378 с.

[32] Бондарь В.С., Даншин В.В. Пластичность. Пропорциональные и непропорциональные нагружения. — М.: Физматлит, 2008. — 176 с.

[33] Новацкий В.К. Волновые задачи теории пластичности. — М.: Мир, 1978. — 307 с.

[34] Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.1. — М.: Наука, 1970. — 492 с.

[35] Работнов Ю.Н. Теория ползучести элементов конструкций. — М.: Наука, 1966. — 752 с.

[36] Майборода В.П., Кравчук А.С., Холин Н.Н. Скоростное деформирование конструкционных материалов. — М.: Машиностроение, 1986. — 264 с.

[37] Zinoviev P.A., Smerdov A.A. Ultimate properties of unidirectional Fiber composites//Composites Science and Technology. — 1999. — V.59. — P. 625-634.

[38] Димитриенко Ю.И. Тензорное исчисление. — М.: Высшая школа, 2001. — 576 с.

[39] Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц. — М.: Мир, 1967. — 386 с.

[40] Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. — М.: Наука,1979. — 640 с.

[41] Димитриенко Ю.И., Соколов А.П. Метод конечного элемента для решения локальных задач механики композиционных материалов: Учебное пособие — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. — 66 с.

УДК 001.4:004:006.354

ОКС 01.040.01
35.240.10
83.120

Ключевые слова: численное моделирование, композиционные материалы, композиты, микроструктура композита, представительный элементарный объем композита, ячейка периодичности композита, класс симметрии композита, тип анизотропии, эффективные свойства композитов, процесс численного моделирования композитов

Редактор *З.А. Лиманская*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *И.Ю. Литовкиной*

Сдано в набор 19.12.2023. Подписано в печать 10.01.2024. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 2,98.

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