ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ГОСТ Р 57971— 2017**

# КОМПОЗИТЫ КЕРАМИЧЕСКИЕ

## Определение предела прочности при кольцевом растяжении при нормальной температуре на цилиндрических образцах с использованием эластомерных вставок

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2017

gost.e-ecolog.ru

## Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Обществом с ограниченной ответственностью «Инновации будущего» совместно с Автономной некоммерческой организацией «Центр нормирования, стандартизации и классификации композитов» при участии Объединения юридических лиц «Союз производителей композитов» на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 497 «Композиты, конструкции и изделия из них»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 ноября 2017 г. № 1790-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к стандарту АСТМ Ц 1819—15 «Стандартный метод испытания для определения кольцевой прочности на растяжение трубных испытательных образцов из композитных материалов с матрицей из высококачественной керамики, армированных непрерывным волокном, при температуре окружающей среды с использованием эластомерной вставки» (ASTM C 1819—15 «Standard Test Method for Hoop Tensile Strength of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramic Composite Tubular Test Specimens at Ambient Temperature Using Elastomeric Inserts», MOD) путем изменения его структуры для приведения в соответствии с правилами, установленными в ГОСТ 1.5—2001 (подразделы 4.2 и 4.3), путем изменения содержания отдельных структурных элементов, которые выделены вертикальной линией, расположенной на полях напротив соответствующего текста. Оригинальный текст этих структурных элементов примененного стандарта АСТМ и объяснения причин внесения технических отклонений приведены в дополнительном приложении ДА.

Дополнительные ссылки, включенные в текст стандарта для учета потребностей национальной экономики Российской Федерации и/или особенностей российской национальной стандартизации, выделены полужирным курсивом.

При этом потребности национальной экономики Российской Федерации и/или особенности российской национальной стандартизации учтены в дополнительном пункте 5.2, который выделен путем заключения его в рамки из тонких линий, а информация с объяснением причин включения этого положения приведена в указанном пункте в виде примечания.

При этом в него не включены разделы 3, 5, 8, 13, подразделы 6.2—6.4, 9.1, 9,4 10.1, 11.3—11.5, приложения примененного стандарта АСТМ, которые нецелесообразно применять в российской национальной стандартизации в связи с тем, что данные разделы, подразделы и приложения носят справочный характер.

Указанные разделы, подразделы и приложения, не включенные в основную часть настоящего стандарта, приведены в дополнительном приложении ДБ.

Исключены ссылки на АСТМ Ц 1145, АСТМ Ц 1239, АСТМ Д 3878, АСТМ Е 4, АСТМ Е 6, АСТМ Е 83, АСТМ Е 177, АСТМ Е 337, АСТМ Е 380, АСТМ Е 691, АСТМ Е 1012, АСТМ IEEE / АСТМ СИ 10 вместе с положениями, в которых они приведены.

Измененные отдельные фразы выделены в тексте курсивом.

Внесение указанных технических отклонений направлено на учет особенностей аспекта стандартизации, характерных для Российской Федерации.

Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем стандарта АСТМ приведено в дополнительном приложении ДВ

5 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 (www.gost.ru)*

© Стандартинформ, 2017

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 Сущность метода . . . 1
4 Оборудование . . . 2
5 Подготовка к проведению испытаний . . . 3
6 Проведение испытаний . . . 3
7 Обработка результатов . . . 5
8 Протокол испытаний . . . 8
Приложение ДА (справочное) Оригинальный текст модифицированных структурных элементов примененного стандарта АСТМ . . . 9
Приложение ДБ (справочное) Оригинальный текст не включенных структурных элементов примененного стандарта АСТМ . . . 17
Приложение ДВ (справочное) Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем стандарта АСТМ . . . 25

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# КОМПОЗИТЫ КЕРАМИЧЕСКИЕ

## Определение предела прочности при кольцевом растяжении при нормальной температуре на цилиндрических образцах с использованием эластомерных вставок

Ceramic composites. Determination of tensile strength at the hoop tension at normal temperature on cylindrical samples with elastomeric inserts

**Дата введения — 2018—06—01**

## 1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на керамические композиты и устанавливает метод определения прочности при кольцевом растяжении при нормальной температуре на цилиндрических образцах с использованием эластомерной вставки.

Примечание — См. ДА.1 (приложение ДА).

## 2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:
***ГОСТ 6507 Микрометры. Технические условия***
***ГОСТ 14359—69 Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования***
***ГОСТ 21616 Тензорезисторы. Общие технические условия***

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 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 Сущность метода

Сущность метода заключается в кратковременном растяжении цилиндрических образцов с эластомерной вставкой.

Примечание — См. ДА.2 (приложение ДА).

**Издание официальное**

## 4 Оборудование

4.1 Испытания проводят на *испытательной машине*, обеспечивающей нагружение эластомерной вставки с заданной постоянной скоростью перемещения активного захвата и измерение нагрузки с погрешностью не более 1 % от измеряемой величины.

4.2 Испытательная машина должна быть снабжена двумя нагружающими стержнями.

4.2.1 Нагружающие стержни могут быть изготовлены из любого материала с достаточным пределом прочности при сжатии для предотвращения текучести нажимного стержня и достаточной жесткостью для предотвращения изгиба.

4.2.2.2 Зазор между нагружающим стержнем и стенкой образца $c$, мм, должен соответствовать условию

$$0{,}04 \le c = (r_i^t - r_0^p) \le \max\begin{cases}0{,}04;\\ 0{,}05 \cdot (2r_0^p)\end{cases}, \qquad (1)$$

где $r_i^t$ — внутренний радиус образца, мм;

$r_0^p$ — радиус нагружающего стержня, мм.

4.2.2.3 Отклонение от концентричности нагружающего стержня должно составлять не более 0,005 мм.

Отклонение от плоскостности торцевых поверхностей нагружающего стержня должно составлять не более 0,005 мм.

Перпендикулярность торца нажимного стержня должна быть не более 0,005 мм. Отклонение от перпендикулярности смежных поверхностей нагружающего стержня должно составлять не более 0,024 мм на каждые 24 мм.

Радиус закругления между торцевыми и боковой поверхностями должен составлять (0,25 ± 0,0) мм.

4.2.2.4 Длина нагружающего стержня $L_p$, мм, должна удовлетворять условию

$$L_p \ge \frac{3{,}5}{\sqrt[4]{\frac{3\left(1-\nu^2\right)}{\left(r_i^{\text{tube}}\right)^2 t^2}}} + L_3, \qquad (2)$$

где $\nu$ — коэффициент Пуассона материала;

$r_i^{\text{tube}}$ — внутренний радиус образца, мм;

$t$ — толщина стенки образца, мм;

$L_3$ — длина рабочей поверхности захвата (длина зажимной части нагружающего стержня), мм.

### 4.3 Эластомерная вставка

4.3.1 Эластомерную вставку (далее — вставка) из уретана, неопрена или силиконового каучука изготавливают механической обработкой из готового изделия или заготовки.

4.3.2 В зависимости от прикладываемой к вставке нагрузки, которая зависит от прочности образца, твердость вставки должна соответствовать требованиям, приведенным в таблице 1.

Таблица 1

| Твердость по Шору *A* | Максимальная рекомендуемая нагрузка, МПа |
|---|---|
| 70 | 12 |
| 90 | 50 |
| 95 | ~130 |

Длина вставки $L$, мм, должна удовлетворять условию

$$L \ge \frac{9}{\sqrt[4]{\frac{3\left(1-\nu^2\right)}{\left(r_i^{\text{tube}}\right)^2 t^2}}}. \qquad (3)$$

Диаметр вставки выбирают таким образом, чтобы зазор между вставкой и стенкой образца был не более 0,04 мм.

Примечание — См. ДА.3 (приложение ДА).

4.4 Для регистрации деформаций используют экстензометры или тензорезисторы по ***ГОСТ 21616*** с номинальной базой не менее 10 мм для продольного направления и не менее 6 мм для поперечного направления.

Примечание — Допускается использовать другие приборы для регистрации деформаций, прикрепление которых не оказывает влияние на определяемые характеристики, не создает дополнительных напряжений или деформаций.

4.5 Микрометр по ***ГОСТ 6507*** для измерений геометрических размеров образца, обеспечивающий измерения с погрешностью не более 0,01 мм.

**4.6 Смазка**

В качестве смазочного материала используют полибутилкуприсил, обычную силиконовую смазку или нефтяной вазелин.

## 5 Подготовка к проведению испытаний

**5.1 Подготовка образцов**

5.1.1 Для определения предела прочности при кольцевом растяжении при нормальной температуре используют не менее пяти образцов, если иное не установлено *в нормативном документе или технической документации на материал и/или изделие*.

5.1.2 Длину образца $L_t$, мм, вычисляют по формуле

$$L_t \geq \frac{16}{\sqrt[4]{\frac{3\left(1-\nu^2\right)}{\left(r_t^{\text{Albe}}\right)^2 t^2}}}. \qquad (4)$$

5.1.3 Условия изготовления образцов, механическая обработка *предусматриваются в нормативном документе или технической документации на материал и/или изделие*.

В случае отсутствия указаний резку и шлифовку образцов проводят при подаче воды для поддержания рабочей зоны и шлифовального диска во влажном состоянии и удаления сошлифованных частиц. Шлифовку допускается проводить в два этапа — сначала грубая, затем тонкая.

Скорость удаления материала должна быть 0,03 мм за проход. Для шлифовки используют алмазный шлифовальный инструмент абразивностью от 320 до 600 грит. По возможности с обеих сторон образцов удаляют равные количества материала.

5.1.4 Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность без вздутий, сколов, неровностей, надрезов, царапин, трещин или других видимых невооруженным глазом дефектов.

5.2 Требования к хранению и кондиционированию образцов должно быть установлено в нормативном документе или технической документации на изделие.

Примечание — Дополнительный по отношению к АСТМ Ц 1819—15 пункт приведен в соответствии с ГОСТ 1.5—2001 (пункт 7.9.7).

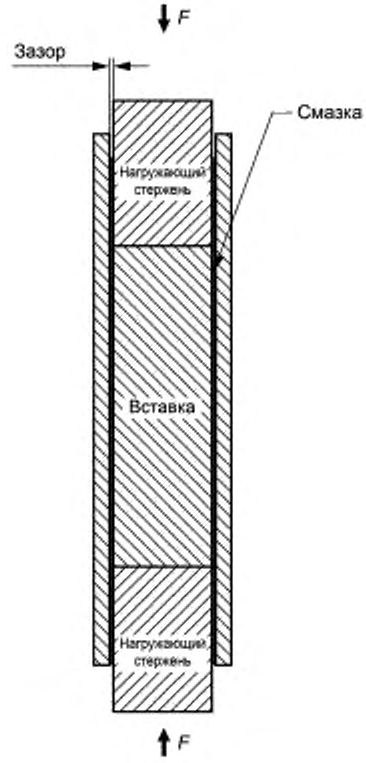
## 6 Проведение испытаний

6.1 Испытания проводят при температуре (23 ± 5) °С и относительной влажности воздуха, не превышающей 65 %.

6.2 Измеряют толщину стенки и наружный диаметр рабочей части образца не менее чем в трех равноудаленных друг от друга точках на рабочем участке образца.

6.3 Маркируют образец: отмечают верх, низ, середину образца, а также лицевую сторону, нумеруют точки установки приборов для регистрации деформаций.

6.4 Собирают приспособление, как показано на рисунке 1.




*F* — нагрузка

Рисунок 1

6.4.1 Очищают и смазывают вставку, нагружающие стержни и внутреннюю часть образца.

6.4.2 Устанавливают вставку и нагружающие стержни в образец, располагая вставку между нагружающими стержнями внутри образца (см. рисунок 2). Закрепляют свободные концы нагружающих стержней в захватах испытательной машины так, чтобы продольные оси вставки, нагружающих стержней и захватов совпали с прямой, соединяющей точки крепления захватов в испытательной машине.

6.5 Испытания проводят с управлением по деформации со скоростью деформирования от $5 \cdot 10^{-6}$ до $50 \cdot 10^{-6}$ $с^{-1}$ или с управлением по напряжению со скоростью изменения напряжения от 35 до 50 МПа/с.

Рекомендуется, чтобы образец разрушался за время от 5 до 10 с.

6.6 При необходимости прикладывают предварительную нагрузку, которую определяют экспериментально для каждого испытуемого материала. Обнуляют показания датчиков деформации.

6.7 Нагружают образец с заданной скоростью деформирования или изменения напряжения вплоть до его разрушения.

В ходе нагружения записывают значение деформации в зависимости от нагрузки. Значения регистрируют непрерывно.

6.8 Измеряют поперечное сечение образца в месте разрушения, если это возможно.

6.9 Измеряют и заносят в протокол место разрушения по отношению к середине рабочего участка образца. За середину рабочего участка условно принимают 0 мм с положительными (+) значениями по направлению к верхней отмеченной части образца и отрицательными (–) значениями по направлению к нижней отмеченной части образца.

Примечание — Под рабочим участком в настоящем стандарте понимают участок образца, соприкасающийся со вставкой, которая находится под нагрузкой.

6.10 Результаты испытания не учитывают, если разрушение образца произошло за пределами рабочего участка образца, и проводят испытания на новом образце.

Примечание — См. ДА.4 (приложение ДА).

## 7 Обработка результатов

7.1 Внутреннее давление, действующее на образец вследствие расширения вставки $p$, МПа, вычисляют по формуле

$$p = \frac{F}{\pi \cdot (r_i^t)^2}, \tag{5}$$

где $F$ — осевая нагрузка, Н;

$r_i^t$ — площадь поперечного сечения рабочей части образца, мм$^2$.

7.2 Осевую нагрузку $F$, Н, вычисляют по формуле

$$F = (1+\frac{s}{S})(F_t - F_r), \tag{6}$$

где $s$ — жесткость вставки, Н/мм;

$S$ — жесткость силовой цепочки (включая нагружающие стержни, захваты, приспособление для нагружения и силоизмерительного устройства), Н/мм;

$F_t$ — общая нагрузка, прикладываемая испытательной машиной, Н;

$F_r$ — остаточная нагрузка на вставке при разрушении, Н.

Примечание — Для «мягкого» материала вставки $F = F_t$.

7.3 Предел прочности при растяжении в окружном направлении $S_{hu}$, МПа, вычисляют по формуле

$$S_{hu} = \eta_m p_{\max} \frac{2(r_i^t)^2}{\left[(r_0^t)-(r_i^t)^2\right]}, \tag{7}$$

где $\eta_m$ — максимальный фактор напряжений;

$p_{\max}$ — максимальное внутреннее давление, Н/мм$^2$;

$r_i^t$ — внутренний радиус образца, мм;

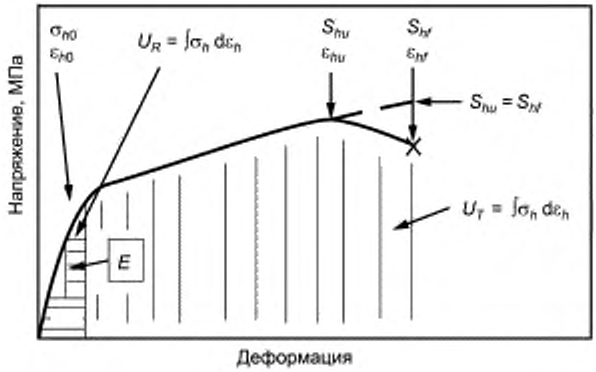
$r_0^t$ — наружный радиус образца, мм.

7.4 Предел прочности при разрыве в окружном направлении $S_{hf}$, МПа, вычисляют по формуле

$$S_{hf} = \eta_m P_f \frac{2(r_i^t)^2}{\left[(r_0^t)^2-(r_i^t)^2\right]}, \tag{8}$$

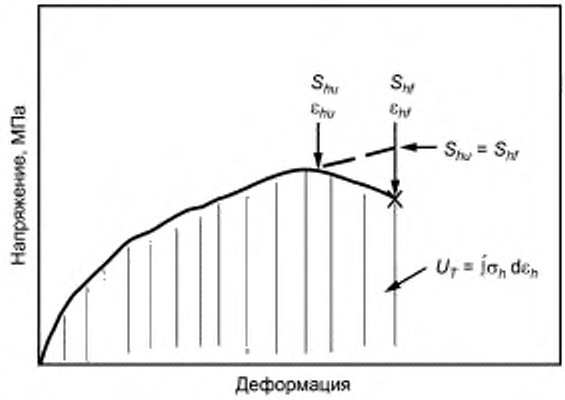
где $P_f$ — внутреннее давление при разрыве, Н/мм$^2$.

В некоторых случаях, как показано на рисунках 2—4, $S_{hu} = S_{hf}$.



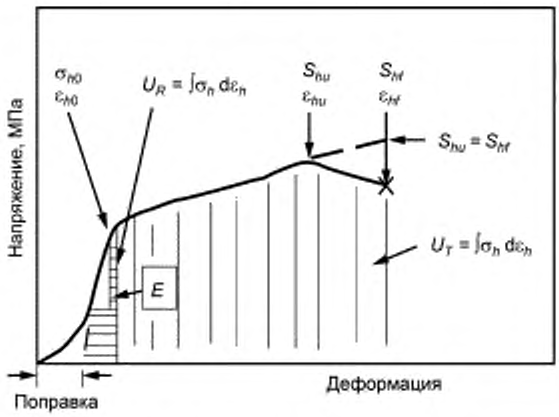

$\sigma_{h0}$ — напряжение на пределе пропорциональности; $\varepsilon_{h0}$ — деформация на пределе пропорциональности, $S_{hu}$ — предел прочности при растяжении в окружном направлении; $S_{hf}$ — предел прочности при разрыве в окружном направлении; $U_R$ — удельная потенциальная энергия растяжения; $U_T$ — удельная работа растяжения; $E$ — модуль упругости при растяжении

Рисунок 2




$S_{hu}$ — предел прочности при растяжении в окружном направлении;
$S_{hf}$ — предел прочности при разрыве в окружном направлении; $U_T$ — удельная работа растяжения

Рисунок 3




$\sigma_{h0}$ — напряжение на пределе пропорциональности; $\varepsilon_{h0}$ — деформация на пределе пропорциональности;
$S_{hu}$ — предел прочности при растяжении в окружном направлении;
$S_{hf}$ — предел прочности при разрыве в окружном направлении; $U_R$ — удельная потенциальная энергия растяжения;
$U_T$ — удельная работа растяжения; $E$ — модуль упругости при растяжении

Рисунок 4

Примечание — В некоторых случаях начальная часть кривой «напряжение — деформация» нелинейна, как показано на рисунке 4, и не отражает свойства материала. Вводят поправку для этого участка, продлив линейную часть кривой «напряжение — деформация» до пересечения с осью «деформация». Точка пересечения является поправкой, вычитаемой из всех значений деформации.

7.5 Модуль упругости при растяжении в окружном направлении $E$, МПа, вычисляют по формуле

$$E = \frac{\Delta\sigma_h}{\Delta\varepsilon_h}, \tag{9}$$

где $\Delta\sigma_h$ — напряжение при растяжении, МПа;

$\Delta\varepsilon_h$ — относительное удлинение.

Величины $\Delta\sigma_h$ и $\Delta\varepsilon_h$ определяют на начальном прямолинейном участке графика «нагружение — деформация».

Для материалов, у которых отсутствует начальный прямолинейный участок (см. рисунок 3), модуль упругости не рассчитывают.

7.6 Коэффициент Пуассона ν вычисляют по формуле

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_L}{\Delta\varepsilon_h}, \tag{10}$$

где $\varepsilon_L$ — продольная деформация;

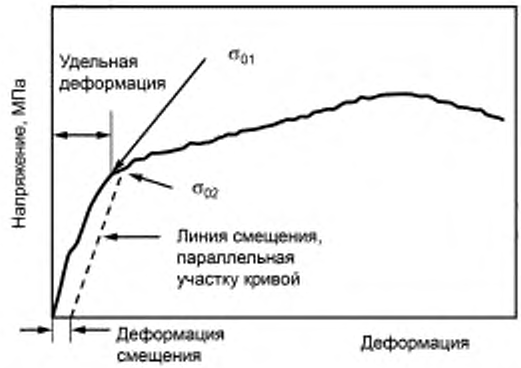
$\varepsilon_h$ — кольцевая деформация.

Для материалов, у которых отсутствует начальный прямолинейный участок (см. рисунок 3), коэффициент Пуассона не рассчитывают.

7.7 Напряжение на пределе пропорциональности определяют по одному из методов, указанных в 7.7.1—7.7.3.

Для материалов, у которых отсутствует начальный прямолинейный участок (см. рисунок 3), напряжение на пределе пропорциональности не рассчитывают.

7.7.1 За предел пропорциональности принимают напряжение в точке пересечения графика «нагружение — деформация» и прямой, параллельной начальному прямолинейному участку данного графика. Прямую смещают с помощью параллельного переноса по оси «деформация» на значение 0,0005 вправо (см. рисунок 5).




$\sigma_{01}$ — напряжение на пределе пропорциональности, полученное по 8.7.2;
$\sigma_{02}$ — напряжение на пределе пропорциональности, полученное по 8.7.1

Рисунок 5

7.7.2 За предел пропорциональности принимают напряжение в точке на графике «нагружение — деформация», соответствующее заданной деформации. Данная заданная деформация может находиться или может не находиться на начальном линейном участке графика «нагружение — деформация», но должна быть постоянной для всех испытаний в серии с указанным уровнем деформации.

7.7.3 За предел пропорциональности принимают напряжение $\sigma_i$, соответствующее заданному отклонению (в процентах) от предела пропорциональности.

Отклонение *dev*, %, вычисляют по формуле

$$\%\ dev = 100\left|\frac{(E\cdot\varepsilon_i)-\sigma_i}{\sigma_i}\right|, \tag{11}$$

где $\varepsilon_i$ — деформация, соответствующая напряжению $\sigma_i$.

Относительное удлинение при пределе пропорциональности определяют по графику «напряжение — деформация» как деформацию, соответствующую напряжению, определенному по 7.7.1—7.7.3.

7.8 Удельную потенциальную энергию растяжения $U_R$, Дж/м$^3$, вычисляют по формуле

$$U_R = \int_0^{\varepsilon_{h0}} \sigma_h d\varepsilon_h \approx \frac{1}{2}\sigma_{h0}\varepsilon_{h0}, \tag{12}$$

где $\sigma_{h0}$ — напряжение на пределе пропорциональности, МПа;

$\varepsilon_{h0}$ — деформация на пределе пропорциональности.

7.9 Удельную работу растяжения $U_T$, Дж/м$^3$, вычисляют по формуле

$$U_T = \int_0^{\varepsilon_{hf}} \sigma_h d\varepsilon_h \approx \frac{\sigma_{h0} + S_{hu}}{2} \varepsilon_{hf}, \quad (13)$$

где $\varepsilon_{hf}$ — деформация при разрыве.

Для материалов, у которых $\sigma_{h0}$ не рассчитано, имеющих график «напряжение — деформация» в виде параболы, удельную работу растяжения $U_T$, Дж/м$^3$, вычисляют по формуле

$$U_T = \int_0^{\varepsilon_{hf}} \sigma_h d\varepsilon_h \approx \frac{2}{3} S_{hu} \varepsilon_{hf}. \quad (14)$$

7.10 Среднеарифметическое значение $\bar{X}$ вычисляют по ***ГОСТ 14359—69 (подраздел 4.3)***.

7.11 Стандартное отклонение $\sigma$ вычисляют по ***ГОСТ 14359—69 подраздел 4.4)***.

7.12 Коэффициент вариации $K_B$, %, вычисляют по ***ГОСТ 14359—69 (подраздел 4.6)***.

## 8 Протокол испытаний

Результаты проведения испытаний оформляют в виде протокола, содержащего:

- ссылку на настоящий стандарт;
- размеры образца;
- материал вставки;
- описание применяемого оборудования;
- количество образцов;
- информацию, необходимую для полной идентификации материалов;
- условия изготовления и механическую обработку образцов;
- условия кондиционирования;
- скорость деформирования или скорость изменения напряжения;
- предварительную нагрузку (если применялась);
- максимальное внутреннее давление;
- деформацию при максимальном внутреннем давлении;
- внутреннее давление при разрушении;
- напряжение на пределе пропорциональности;
- деформацию на пределе пропорциональности;
- предел пропорциональности при растяжении в окружном направлении;
- предел прочности при разрыве в окружном направлении;
- модуль упругости при растяжении в окружном направлении;
- коэффициент Пуассона;
- отклонение dev;
- удельную потенциальную энергию растяжения;
- удельную работу растяжения;
- статистическую обработку данных;
- дату и время проведения испытания.

**Приложение ДА**
**(справочное)**

## Оригинальный текст модифицированных структурных элементов примененного стандарта АСТМ

**ДА.1**

**1. Область применения**

1.1 В данном методе испытаний описана процедура определения кольцевой прочности на растяжение, включая определение профиля «напряжение/деформация» труб из высококачественной керамики, армированных непрерывным волокном, подвергающихся действию внутреннего давления, являющегося результатом расширения эластомерной вставки, к которой приложено монотонное одноосное нагружение при температуре окружающей среды. Такую схему проведения испытаний иногда называют свободно подвешенной трубой. Данный метод испытаний индивидуален для труб различной геометрии, так как совокупность дефектов, строение волокон и геометрия образцов зачастую резко различаются в трубах из композитных материалов, по сравнению с плоскими листами.

1.2 В рамках данного метода испытаний трубу/цилиндрический элемент из композитного материала с определенным расчетным участком и известной толщиной стенки подвергают нагружению посредством внутреннего повышения давления из-за радиального расширения эластомерной вставки (расположенной посередине внутри трубы), которая сжимается в продольном направлении с обоих концов стержнями. Эластомерная вставка расширяется под действием одноосного сжимающего нагружения со стороны стержней и создает равномерное радиальное давление изнутри трубы. Результирующий кольцевой профиль «напряжение/деформация» трубы из композитного материала регистрируют до момента разрушения трубы. Кольцевую прочность на растяжение и кольцевую прочность на разрыв определяют по результирующему максимальному давлению и по давлению при разрыве соответственно. Кольцевые деформации растяжения, кольцевое напряжение предела пропорциональности и модуль упругости в кольцевом направлении определяют по данным о деформациях от напряжения. Обратите внимание, что кольцевая прочность на растяжение, используемая в данном методе испытаний, относится к прочности на растяжение в кольцевом направлении от приложенного давления от монотонно и одноосно нагруженной эластомерной вставки, где монотонность представляет собой непрерывность проведения испытания без изменения направления нагрузки с момента начала испытания до окончательного разрушения.

1.3 Главным образом данный метод испытаний применяют к трубам из композитного материала с матрицей из высококачественной керамики, армированной непрерывным волокном: однонаправленного (1-D, намотка волокном и укладка ленты), двухнаправленного (2-D, укладка ткани/ленты и переплетение) и трехнаправленного (3-D, плетено-тканый). Эти типы композитных материалов с матрицей из керамики могут состоять из целого ряда керамических волокон (на основе оксидов, графита, карбидов, нитридов и прочих веществ), включаемых в разнообразные матрицы из керамики с кристаллической или неупорядоченной структурой (на основе оксидов, карбидов, нитридов, углерода, графита и прочих веществ).

1.4 Данный метод испытаний не относится напрямую к керамике, армированной прерывистым волокном, нитевидными кристаллами или макрочастицами, хотя описанный здесь метод испытаний может быть в равной степени применим к таким композитным материалам.

1.5 Метод испытаний применим к трубчатым испытательным образцам различной геометрии на основании безразмерного параметра, который включает в себя свойства композитного материала и радиус трубы. Длины трубы из композитного материала, стержней и эластомерной вставки определяются по данному безразмерному параметру для того, чтобы обеспечить длину расчетного участка с равномерным внутренним радиальным давлением. Возможен целый ряд комбинаций свойств материалов, радиусов трубы, толщин стенки, длин трубы и длин вставки.

1.5.1 Данный метод испытаний характерен для проведения испытаний при температуре окружающей среды. Для проведения испытаний при повышенных температурах требуются высокотемпературные печи и нагревательные приборы с контролем температуры, а также измерительные системы, специальные ручки для высоких температур и приспособления для нагружения, которые не рассматриваются в данном стандарте испытаний.

1.6 Данный метод испытаний рассматривает трубчатые испытательные образцы, методы отбора испытательных образцов, интенсивность проведения испытаний (скорость приложения усилия, скорость приложения давления,

скорость перемещения или скорость распространения деформаций), а также сбор данных и процедуру протоколирования в последующих разделах.

Примечание — Редакция раздела изменена для приведения в соответствие с требованиями ГОСТ Р 1.5—2012 (подраздел 3.1) и ГОСТ 1.5—2001 (подраздел 3.7).

**ДА.2**

**4. Краткое описание методики**

4.1 В рамках данного метода испытаний трубу / цилиндрический элемент из композитного материала с определенным расчетным участком и известной толщиной стенки подвергают нагружению из-за радиального расширения эластомерной вставки (расположенной посередине внутри трубы), которая сжимается в продольном направлении между нажимными стержнями. Эластомерная вставка расширяется под действием одноосного сжимающего нагружения со стороны стержней и создает равномерное радиальное давление изнутри трубы. Результирующий кольцевой профиль «напряжение/деформация» трубы из композитного материала регистрируют до момента разрушения трубы. Кольцевая прочность на растяжение и кольцевая прочность на разрыв определяются по результирующему максимальному давлению и по давлению при разрыве.

4.2 Кольцевая прочность на растяжение, используемая в данном методе испытаний, относится к прочности на растяжение в кольцевом направлении от приложенного давления от монотонно и одноосно нагруженной эластомерной вставки, где монотонность представляет собой непрерывность проведения испытания без изменения направления нагрузки.

4.3 Метод испытаний применим к трубчатым испытательным образцам различной геометрии на основании безразмерного параметра, который включает в себя свойства композитного материала и радиус трубы. Длины трубы из композитного материала, стержней и эластомерной вставки определяются по данному безразмерному параметру для того, чтобы обеспечить длину расчетного участка с равномерным внутренним радиальным давлением. Возможен целый ряд комбинаций свойств материалов, радиусов трубы, толщин стенки, длин трубы и длин вставки.

Примечание — Редакция раздела изменена для приведения в соответствие с требованиями ГОСТ 1.5—2001 (пункт 7.9.5).

**ДА.3**

7.2 Приспособления

7.2.1 Общая информация. Приспособление для сжатия, как правило, состоит из двух частей: *(1)* основные стальные фиксаторы испытательной машины (например, гидравлические v-образные приспособления), присоединенные к испытательной машине, и *(2)* нажимные стержни, которые жестко закреплены в фиксаторах испытательной машины и действуют в качестве поверхности контакта между фиксаторами и эластомерной вставкой. Схематический чертеж таких приспособлений и испытательного образца показан на рисунке 2. Фактическая испытательная установка показана на рисунке 3. В качестве другого варианта приспособления для сжатия можно использовать *(1)* зажимы, присоединенные к испытательной машине, и *(2)* нажимные стержни, которые удерживаются в зажимах испытательной машины и действуют в качестве поверхности контакта между зажимами и эластомерной вставкой.

7.2.2 При испытании вставкой единственным соединением между нагнетающим давление оборудованием и испытываемой трубой является пленка смазки для высоких давлений (рисунок 2). Испытания показали, что такая пленка смазки сохраняет постоянную толщину во время испытания до максимального давления (1). Целью этого является передача приложенного усилия от нажимного стержня через пленку смазки к внутренней стенке испытываемой трубы. Однако есть указания на то, что вставка ведет себя так же, как гидравлическая среда, до величин продольного сжатия, как минимум 5 % от деформации.

7.2.3 Вставки. Обычно используют вставки из промышленного материала из-за широкого диапазона доступных величин твердости. «Корректную» твердость выбирают путем определения усилия вставки и соответствующего давления при разрушении трубчатого испытательного образца из КМКМ.

7.2.3.1 Вставки могут быть получены механическим образом из предварительно изготовленного блока или изготовленного «на месте» (то есть внутри трубчатого испытательного образца). Однако крайне важно чистовое шлифование до окончательного диаметра и длины таким образом, чтобы торцевые поверхности были перпендикулярны диаметру.

7.2.3.2 Длину вставки выбирают исходя из размеров трубчатого испытательного образца и свойств материала. Вставка занимает только центральную часть трубы по двум причинам: концы трубы играют роль направляющих для нажимных стержней, и при корректном выборе размеров согласно требованиям данного метода испытаний концы трубы, находящиеся не под давлением, могут быть изготовлены таким образом, чтобы напряжения на торцевых поверхностях были незначительны.

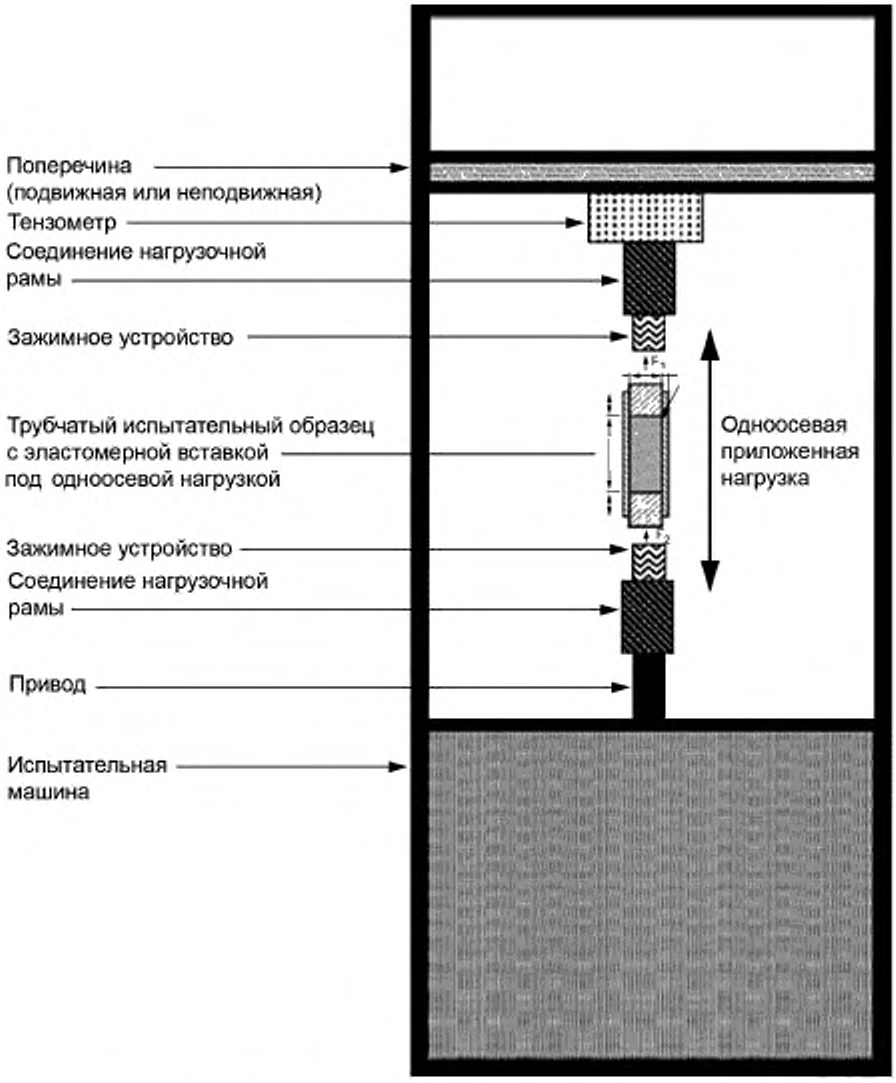



Рисунок — 1 Схематическое изображение одного из возможных приборов для приложения одноосевого усилия к эластомерной вставке для проведения испытаний трубы из КМКМ на кольцевую прочность на растяжение под действием внутреннего давления

7.2.3.3 Предыдущие исследования показали, что длина участка трубы под давлением, $L$, и, следовательно, исходная длина вставки должна составлять

$$L \geq 9/\beta \quad \text{и} \quad (1)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3\left(1 - \nu^2\right)}{\left(r_i^{tube}\right)^2 t^2}},$$

где $\nu$ — коэффициент Пуассона испытательного материала;

$r_i^{tube}$ — внутренний радиус трубчатого испытательного образца, мм;

$t$ — толщина стенки трубчатого испытательного образца, мм.

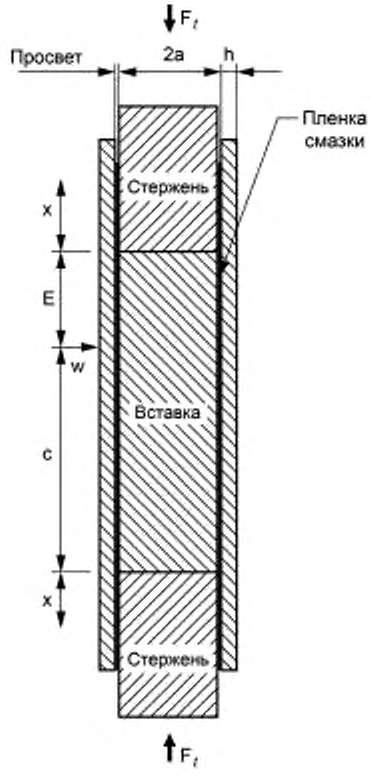



Рисунок 2 — Схематическое изображение вставки с одноосевой нагрузкой [см. 1]

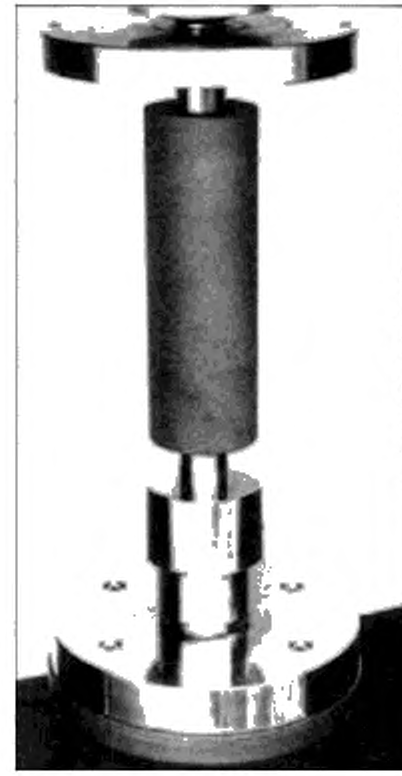


Рисунок 3 — Пример испытательной установки для трубы с одноосевой нагрузкой

Таблица 1 — Максимальное рекомендуемое давление вставки

| Твердость по Шору (A) | Максимальное рекомендуемое давление (МПа = Н/мм$^2$) |
|---|---|
| 70 | 12 |
| 90 | 50 |
| 95 | ~130 |

Примечание 2 — Пример трубы из КМКМ промышленного использования (v = 0,15) с наружным диаметром 100 мм и толщиной стенки 2 мм.

В данном случае $\beta = \sqrt[4]{\frac{3\left(1-\nu^2\right)}{\left(r_t^{tube}\right)^2 t^2}} = \sqrt[4]{\frac{3\left(1-0{,}15^2\right)}{\left([100-2(2)]/2\right)^2 2^2}} = 0{,}133 \cdot /\text{mm} \cdot L = \frac{9}{\beta} = \frac{9}{0{,}133} = 67{,}38$ мм.

7.2.4 *Нажимные стержни.* Нажимные стержни изготавливают из любого материала с достаточным пределом прочности на сжатие для предотвращения текучести нажимного стержня и с достаточной жесткостью для предотвращения прогиба. Требуется чистовое шлифование нажимного стержня и его торцов для соответствия требованиям по зазору, плоскостности поверхности и перпендикулярности/прямолинейности, как показано на рисунке 4.

7.2.4.1 Зазор между нажимным стержнем и стенкой трубы испытательного образца должен попадать в следующий диапазон

$$0{,}04\ \text{mm} \le c = \left(r_t^{tube} - r_0^{pushrod}\right) \le \max\begin{cases}0{,}04\ \text{mm} \\ 0{,}05\left(2r_0^{pushrod}\right)\end{cases}. \qquad (2)$$




Рисунок 4 — Детальное изображение поверхности контакта между нажимным стержнем и вставкой

7.2.4.2 Концентричность нажимного стержня по всей длине должна составлять не более 0,005 мм. Плоскостность торца нажимного стержня должна составлять не более 0,005 мм. Перпендикулярность торца нажимного стержня должна составлять не более 0,005 мм с отклонением не более 0,024 мм на каждые 24 мм.

7.2.4.3 Длина каждого нажимного стержня должна включать в себя длину участка трубы, не находящегося под давлением, плюс длину нажимного стержня, вставляемого в фиксатор, плюс длину трубы, требующуюся для компенсации сжатия вставки в процессе испытания. Слишком большая длина нажимного стержня может стать одной из причин прогиба в процессе испытания. Слишком маленькая длина нажимного стержня может привести к столкновению испытательного образца с испытательной машиной / фиксаторами в процессе испытания. Рекомендованная длина нажимного стержня составляет как минимум половину участка трубчатого испытательного образца, не находящегося под давлением, плюс длина фиксаторов, таким образом

$$L_{\text{pushrod}} \geq = \left(\frac{3,5}{\beta}\right) + \text{grip length; и } X = \frac{3,5}{\beta} \qquad (3)$$

*= минимум половина трубчатого испытательного образца, не находящегося под давлением.*

Примечание 3 — Пример трубы из КМКМ промышленного использования (ν = 0,15) с наружным диаметром 100 мм и толщиной стенки 2 мм.

В данном случае $\beta = \sqrt[4]{\frac{3\left(1-\nu^2\right)}{\left(r_i^{\text{tube}}\right)^2 t^2}} = \sqrt[4]{\frac{3\left(1-0,15^2\right)}{\left(\left[100-2(2)\right]/2\right)^2 2^2}} = 0,133 \cdot \text{// mm},$

так что $X = \frac{3,5}{\beta} = \frac{3,5}{0,133} = 26,2 \text{ in } L_{\text{pushrod}} = 26,2 + L_{\text{grip}}$ мм.

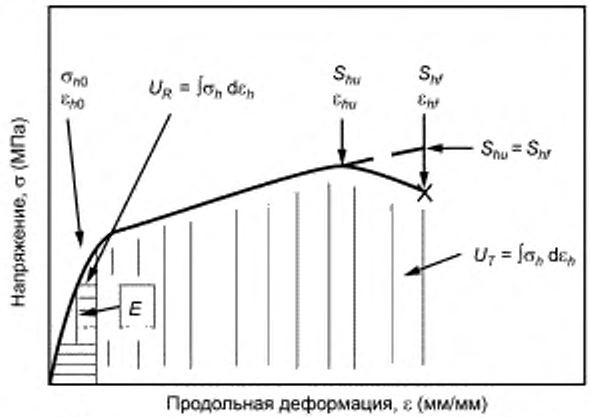
Примечание — Редакция раздела изменена для приведения в соответствие с требованиями ГОСТ 1.5—2001 (пункт 7.9.6).

**ДА.4**

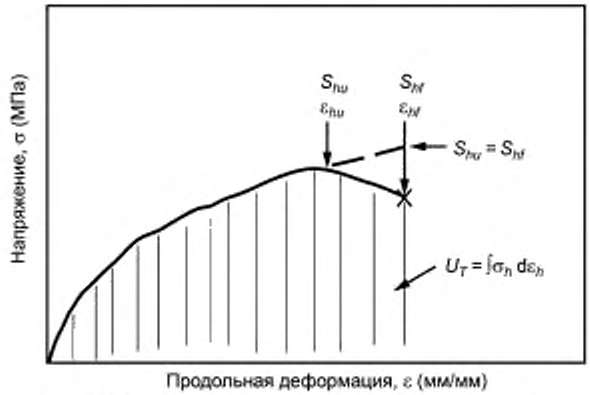
10.2 *Испытательные режимы и скорости*

10.2.1 *Общая информация.* Испытательные режимы и скорости могут оказывать четкое и сильное воздействие на механизм разрушения высококачественной керамики даже при температурах окружающей среды в зависимости от испытательной среды или состояния испытательного образца. Испытательные режимы могут включать в себя контроль усилий, перемещений или деформаций. Рекомендуемые скорости испытания должны быть достаточно высокими для получения максимальной возможной кольцевой прочности на растяжение при разрушении материала. Однако можно использовать и скорости, отличные от рекомендуемых, для оценки влияния скорости на результаты. Во всех случаях испытательный режим и скорость должны быть занесены в протокол.

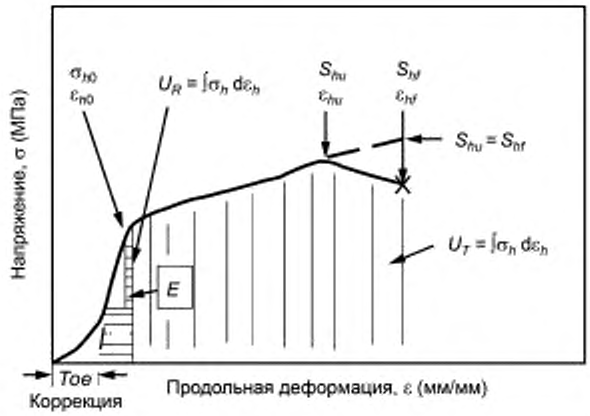
10.2.1.1 Для монолитной высококачественной керамики, демонстрирующей линейно-упругое поведение, разрушение приписывается механизму разрушения по слабому звену, который в основном относится к разрушению с контролируемым напряжением от дефектов Гриффита. Поэтому предпочтительно пользоваться испытанием с контролируемым усилием, где усилие напрямую связано с кольцевым растягивающим напряжением. Однако в КМКМ нелинейный характер профиля «напряжение — деформация» при постепенном процессе разрушения этих материалов показывает наличие процесса суммарного повреждения, который зависит от деформаций. Как правило, испытания с контролируемым перемещением или деформацией используют в подобных процессах суммарного повреждения или деформации текучести для предотвращения выхода ситуации из-под контроля (иными словами, быстрое неконтролируемое развитие деформации или разрушения), что характерно для испытаний с контролируемым усилием или напряжением. Таким образом, для изучения потенциальных механизмов «упрочнения» при контролируемом разрушении КМКМ предпочтительно пользоваться испытаниями с контролируемым перемещением или деформацией. Однако для достаточно высоких скоростей проведения испытания различия в механизме разрушения могут быть незначительными, и может подойти любой из этих испытательных режимов.




a) Кривая «напряжение/деформация» с линейной областью




b) Нелинейная кривая «напряжение/деформация»




Примечание — При больших участках деформации на кривых отображены два различных вероятных механизма: случаи, когда напряжение падает перед разрушением (сплошная линия), и случаи, когда напряжение продолжает увеличиваться в точке разрушения (пунктирная линия).

Рисунок 5 — Схематические изображения кривых «напряжение/деформация» для КМКМ

10.2.2 *Скорость деформации*. Деформация представляет собой независимую переменную в нелинейных анализах, таких как анализ текучести. Таким образом, скорость деформации является величиной, позволяющей контролировать процессы деформации во избежание выхода ситуации из-под контроля. Для линейно-упругой области КМКМ скорость деформации может соответствовать измерениям деформации следующим образом

$$\dot{\varepsilon}_L = \frac{d\varepsilon}{dT}, \quad (5)$$

где $\dot{\varepsilon}_L$ — скорость деформации вставки, (мм/мм)/с;

$d\varepsilon/dT$ — уклон кривой «деформация/время», (мм/мм)/с.

Обратите внимание, что испытания с контролируемой деформацией могут выполняться с помощью поперечного или кольцевого экстензометра, контактирующего с расчетным участком образца в качестве основного контрольного датчика. Рекомендуются скорости деформации порядка от $5 \cdot 10^{-6}$ до $50 \cdot 10^{-6}$ $с^{-1}$ для минимизации влияния внешних условий при испытании в условиях окружающей атмосферы. Или же скорости деформации должны выбираться таким образом, чтобы создавать окончательное разрушение через 5—10 с для минимизации влияния внешних условий при испытании в условиях окружающей атмосферы.

10.2.3 *Скорость перемещения*. Различия в размерах каждого испытательного образца требуют использования различной скорости проведения испытаний для любой заданной скорости нарастания напряжений. Обратите внимание, что как только испытательный образец начнет разрушаться, скорость деформации в расчетном участке образца будет меняться даже несмотря на то, что скорость перемещения поперечины машины остается постоянной. По этой причине испытания с контролируемой скоростью перемещения могут дать только ориентировочную величину сообщенной скорости деформации. Режим перемещения определяется в зависимости от наличия контроля перемещения поперечины испытательной машины или ее свободного перемещения. Таким образом, скорость перемещения может рассчитываться следующим образом. Скорости деформации должны выбираться таким образом, чтобы создавать окончательное разрушение через 5—10 с для минимизации влияния внешних условий при испытании в условиях окружающей атмосферы. Используя рекомендованную (или требуемую) скорость деформации, как подробно описано в разделе 9.2.2, скорость перемещения для линейно-упругой области КМКМ вычисляют по формуле

$$\dot{\delta} = \frac{d\delta}{dT}, \quad (6)$$

где $\dot{\delta}$ — скорость перемещения поперечины, мм/с;

$\delta$ — перемещение поперечины, мм;

$T$ — время, с.

10.2.4 *Скорость приложения усилия*. Для материалов, которые не подвергают макроскопическим изменениям в поперечном сечении расчетного участка, скорость приложения усилия может быть напрямую связана со скоростью нарастания напряжений, а следовательно, и с рекомендованной (или требуемой) скоростью деформации. Обратите внимание, что как только испытательный образец начнет разрушаться, скорость деформации в расчетном участке испытательного образца будет меняться даже несмотря на то, что скорость приложения усилия остается постоянной. Скорости нарастания напряжений > 35—50 МПа/с успешно применялись для минимизации влияния внешних условий и, таким образом, для получения наибольшего значения предельной кольцевой прочности на разрыв. С другой стороны, скорости нарастания напряжений и приложения усилия должны выбираться таким образом, чтобы создавать окончательное разрушение через 5—10 с для минимизации влияния внешних условий при испытании в условиях окружающей атмосферы. Для линейно-упругой области КМКМ скорость приложения усилия вычисляют по формуле

$$\dot{F} = \frac{dF}{dT}, \quad (7)$$

где $\dot{F}$ — скорость приложения усилия, Н/с;

$F$ — приложенное усилие, Н;

$T$ — время, с.

10.2.5 *Линейно-возрастающие сегменты*. Обычно испытания проводятся по простой линейно-возрастающей функции с отдельной скоростью проведения испытания от нулевого до максимального усилия в момент разрушения. Однако в некоторых случаях можно применять многократные линейно-возрастающие сегменты. В таких случаях применяют низкую скорость проведения испытания для линейного возрастания от нулевого до промежуточного усилия, что дает время для удаления «провисания» из испытательной системы. Конечный линейно-возрастающий сегмент испытания выполняют от промежуточного до максимального усилия в момент разрушения с требуемой (желаемой) скоростью проведения испытания. Тип и продолжительность линейного возрастания следует занести в протокол.

10.3 *Выполнение испытания на кольцевую прочность на растяжение*

10.3.1 *Установка испытательного образца*. Необходимо произвести сборку нажимных стержней, вставки и трубчатого испытательного образца перед тем, как можно будет приступить к испытанию. Необходимо идентифицировать компоненты, требуемые для каждого испытания, и отметить в протоколе испытаний. Помечают испытательный образец с помощью нестираемого маркера сверху, снизу и спереди (со стороны, обращенной к оператору)

относительно испытательной машины. В случае испытательных образцов с тензодатчиками располагают испытательный образец таким образом, чтобы «передняя» сторона испытательного образца и уникальный тензодатчик (например, Strain Gage 1, обозначаемый SG1) совпадали. Помечают каждый нажимной стержень, чтобы показать длину участка, находящегося не под давлением, *X*, от конца нажимного стержня, контактирующего со вставкой.

10.3.2 *Подготовка к испытанию.* Очищают и смазывают вставку, нажимные стержни и внутренний канал трубчатого испытательного образца. Помещают вставку в трубу. Помещают нажимные стержни в оба конца трубчатого испытательного образца, располагая вставку между двумя концами нажимных стержней внутри трубы. Вставляют два свободных конца нажимных стержней в верхний и нижний фиксаторы испытательной машины. Устанавливают режим испытания и скорость проведения испытания на испытательной машине. Временно поддерживают испытательный образец таким образом, чтобы вставка была отцентрирована в испытательном образце между двумя нажимными стержнями. Предварительно нагружают вставку, чтобы убрать «слабину» с нагрузочной рамы и заполнить зазор между вставкой и стенкой трубы таким образом, чтобы отпала необходимость во временных опорах и можно было их убрать. Предварительная нагрузка будет зависеть от материала вставки и зазора между вставкой и стенкой трубы, поэтому следует ее определять конкретно для каждой ситуации. Устанавливают соответствующий экстензометр на расчетном участке испытательного образца и обнуляют выходные сигналы или присоединяют выводные провода тензодатчиков к блоку преобразования сигналов и обнуляют выходные сигналы. Подготавливают системы сбора данных для их регистрации. Располагают защиту вокруг испытательного образца.

Примечание — Смазочные материалы включают в себя, например, полибутилкуприсил (ПБК), обычную силиконовую смазку или нефтяной вазелин.

10.3.3 *Выполнение испытания.* Запускают сбор данных. Запускают испытательный режим. После разрушения образца отключают испытательную машину и сбор данных. Разрушающее усилие должно быть измерено с точностью ±1,0 % и отмечено в протоколе. Аккуратно убирают нажимные стержни (и вставку, если это возможно) из испытательного образца. Если труба разрушена на куски, то следует следить, чтобы не повредить поверхности разрушения, не позволяя им контактировать друг с другом или с другими объектами. Помещают разрушенные части испытательного образца вместе с прочими фрагментами расчетного участка в подходящий неметаллический контейнер для последующего анализа, не вдыхая любые частицы или волокна.

10.3.4 Определяют относительную влажность в соответствии с АСТМ Е 337.

10.3.5 *Измерения после испытаний.* Измерение размеров поперечного сечения расчетного участка в месте разрушения может быть выполнено, а результаты занесены в протокол с точностью до 0,02 мм, если расчетный участок не полностью фрагментирован в результате разрушения. Если точное измерение размеров поперечного сечения не может быть выполнено из-за фрагментирования, тогда следует использовать средние размеры, измеренные в разделе 9.1.

10.3.5.1 Измеряют и заносят в протокол месторасположение разрушения по отношению к середине расчетного участка. Середина расчетного участка условно принимается за 0 мм с положительными (+) значениями по направлению к верхней отмеченной части испытательного образца и отрицательными (–) значениями по направлению к нижней отмеченной части испытательного образца.

10.3.5.2 Обратите внимание, что результаты, полученные от испытательных образцов, разрушенных за пределами равномерно нагруженного внутренним давлением расчетного участка, не рекомендуется использовать для прямого расчета средней кольцевой прочности на растяжение для полного испытания. Результаты, полученные от испытательных образцов, разрушенных за пределами равномерно нагруженного внутренним давлением участка, считаются аномальными и могут использоваться только в качестве усеченных испытаний (иными словами, испытательные образцы, в которых кольцевое растягивающее напряжение, равное по меньшей мере напряжению, рассчитанному по формуле (7), поддерживалось в равномерно нагруженном внутренним давлением расчетном участке перед тем, как испытание было преждевременно прекращено из-за разрушения не в расчетном участке), как описано в АСТМ Ц 1239, для определения параметров распределения прочности. С консервативной точки зрения, для завершения требуемой статистической выборки (например, $N = 10$) с целью оценки средней прочности следует испытывать один испытательный образец вместо каждого испытательного образца, который разрушился за пределами расчетного участка.

10.3.5.3 Для определения механизма и типа разрушения (иными словами, хрупкий или волокнистый излом) следует проводить визуальный контроль и оптическую микроскопию. Кроме того, хотя количественные измерения находятся вне рамок данного метода испытаний, можно выполнить субъективные наблюдения касательно длины вытянутого волокна, ориентации плоскости излома, степени межслойного разрушения и прочих относящихся к делу деталей относительно поверхности разрушения.

10.4 *Фрактография.* Рекомендуется выполнять фрактографическое исследование каждого разрушенного испытательного образца для определения механизма разрушения КМКМ. Если фрактографический анализ не проводился, то это должно быть четко отмечено в протоколе испытаний.

Примечание — Редакция раздела изменена для приведения в соответствие с требованиями ГОСТ 1.5—2001 (пункт 7.9.8).

**Приложение ДБ**
**(справочное)**

## Оригинальный текст не включенных структурных элементов примененного стандарта АСТМ

**ДБ.1**

**3 Терминология**

3.1 Определения

3.1.1 Определения терминов, относящихся к испытаниям на кольцевую прочность на растяжение, представленные в АСТМ Е 6, применимы и к терминам, используемым в данном методе испытаний. Определения терминов, относящихся к высококачественной керамике, представленные в АСТМ Ц 1145, применимы и к терминам, используемым в данном методе испытаний. Определения терминов, относящихся к композитным материалам, армированным волокном, представленные в АСТМ Д 3878, применимы и к терминам, используемым в данном методе испытаний. Соответствующие определения, перечисленные в АСТМ Е 1012, АСТМ Ц 1145, АСТМ Д 3878 и АСТМ Е 6, представлены далее с указанием в скобках соответствующего источника. Дополнительные термины, используемые в рамках данного метода испытаний, представлены далее.

3.1.2 **высококачественная керамика:** Конструктивно сложный, высокоэффективный, преимущественно неметаллический, неорганический, керамический материал, обладающий специфическими функциональными свойствами (см. АСТМ Ц 1145).

3.1.3 **разрывная сила:** Сила, при которой происходит разрушение (см. АСТМ Е 6).

3.1.4 **композитный материал с керамической матрицей (КМКМ):** Материал, состоящий из двух или более материалов (нерастворимых друг в друге), в котором основным, постоянным компонентом (матричным компонентом) является керамика, при этом вторичным компонентом (-ми) (армирующим компонентом) может быть керамика, стеклокерамика, стекло, металл или органические материалы. Такие компоненты комбинируются на макроразмерном уровне, формируя эффективный технический материал, обладающий определенными свойствами или поведением, которые не свойственны индивидуальным составляющим компонентам.

3.1.5 **композитный материал с керамической матрицей, армированный непрерывным волокном (КМКМАНВ):** Композитный материал с керамической матрицей, в котором армирующая фаза состоит из непрерывного волокна, непрерывной нити или тканого полотна.

3.1.6 **расчетный участок:** Первоначальная длина того участка образца, на котором определяется деформация или изменение длины (см. АСТМ Е 6).

3.1.7 **кольцевая прочность на растяжение:** Максимальная компонента растяжения кольцевого напряжения, которую способен выдержать материал. Кольцевая прочность на растяжение рассчитывается по максимальному внутреннему давлению, действующему в трубчатом испытательном образце.

3.1.8 **напряжение растрескивания матрицы:** Прикладываемое растягивающее напряжение, при котором матрица растрескивается на ряд приблизительно параллельных блоков, перпендикулярных растягивающему напряжению.

3.1.8.1 Обсуждение. В некоторых случаях напряжение растрескивания матрицы может быть показано на кривой «напряжение/деформация» в форме отклонения от линейности (предел пропорциональности) или в форме нарастающего падения напряжения при увеличении деформации. В прочих случаях, особенно при использовании материалов, у которых нет линейной области на кривой «напряжение/деформация», напряжение растрескивания матрицы может быть показано в виде первого напряжения, при котором начинает фиксироваться деформация постоянного смещения при снятии нагружения (предел упругости).

3.1.9 **модуль упругости:** Отношение напряжения к соответствующей деформации ниже предела пропорциональности (см. АСТМ Е 6).

3.1.10 **удельная работа упругой деформации:** Энергия деформации на единицу объема, требуемая для упругого напряжения материала с нуля до предела пропорциональности, показывающая способность материала поглощать энергию при упругой деформации и возвращаться в исходную форму при снятии нагружения.

3.1.11 **модуль устойчивости:** Энергия деформации на единицу объема, требуемая напряжения материала с нуля до окончательного разрушения, показывающая способность материала поглощать энергию за пределами области упругих деформаций (иными словами, допускаемое повреждение материала).

3.1.11.1 Обсуждение. Модуль устойчивости также может быть назван энергией суммарного повреждения и, по существу, рассматриваться как показатель способности материала выдерживать повреждения, а не как свойство материала. Методы механического разрушения материалов для определения характеристик КМКМ не были разработаны. Определение модуля устойчивости, как установлено в данном методе испытаний, для определения характеристик процесса суммарного повреждения в КМКМ может перестать быть актуальным, когда появятся методы механического разрушения для КМКМ.

3.1.12 **напряжение предела пропорциональности:** Наибольшее напряжение, которое способен выдерживать материал без любых отклонений от пропорциональности напряжения к деформации (закон Гука).

3.1.12.1 Обсуждение. Многочисленные эксперименты показали, что значения, наблюдаемые для напряжения предела пропорциональности, в значительной степени меняются в зависимости от чувствительности и точности испытательного оборудования, эксцентричности нагружения, масштаба, в котором наносится на график диаграмма «напряжение/деформация», и прочих факторов. При необходимости определения предела пропорциональности следует установить процедуру испытания и чувствительность испытательного оборудования (см. АСТМ Е 6).

3.1.13 **медленный рост трещины, сущ:** Докритический рост трещины (распространение), который может быть следствием таких механизмов, как коррозионное растрескивание под воздействием окружающей среды или диффузионное растрескивание.

**ДБ.2**

**5. Значимость и применение**

5.1 Данный метод испытаний (иначе называемый методом свободно подвешенной трубы) может быть использован для разработки материалов, сравнения материалов, отбора материалов, отсеивания материалов и контроля качества. Данный метод испытаний не рекомендуется для определения характеристик материалов, формирования исходных данных для проектирования и/или проверки/подтверждения модели деформации материалов.

5.2 Композитные материалы с керамической матрицей, армированные непрерывным волокном (КМКМАНВ), состоят из непрерывного направленного (1-D, 2-D и 3-D) усиления из керамического волокна в мелкозернистой (< 50 мкм) керамической матрице с контролируемой пористостью. Зачастую такие композитные материалы имеют тонкое (от 0,1 до 10 мкм) специализированное покрытие поверхности волокон для отклонения трещин и вытягивания волокон.

5.3 Компоненты КМКМАНВ характеризуются особенной и взаимоусиливающейся комбинацией свойств материалов, покрытий поверхностей раздела, контроля пористости, композитной структуры (1-D, 2-D и 3-D) и геометрической формы, причем все эти факторы обычно неотделимы друг от друга. Прогнозирование механических характеристик труб из КМКМАНВ (особенно с плетеной и 3-D-тканой структурой) не может быть выполнено посредством переноса измеренных свойств плоского листа из КМКМАНВ на трубы. В частности, трубчатые компоненты, изготовленные из КМКМ, образуют уникальную взаимоусиливающуюся комбинацию материала и геометрической формы, причем эти факторы неотделимы друг от друга. Иными словами, прогнозирование механических характеристик труб из КМКМ обычно не может быть выполнено посредством использования измеренных свойств плоского листа. Испытание на прочность труб из КМКМ под действием внутреннего давления дает информацию о механических свойствах и прочности материала, подвергнутого напряжению по многим осям.

5.4 В отличие от монолитной высококачественной керамики, которая катастрофически разрушается из-за отдельного основного дефекта, КМКМ обычно подвергается воздействию постепенного разрушения, связанного с процессом суммарного повреждения. Поэтому, несмотря на то что объем материала, подвергающегося равномерному кольцевому растягивающему напряжению для испытания отдельной равномерно подверженной действию давления трубы, может быть значимым фактором для определения напряжения растрескивания матрицы, такой же объем может не быть таким же значимым фактором для определения предельной прочности КМКМ. Однако вероятностный характер распределения прочности хрупких матриц КМКМ требует применения статистически значимого количества испытательных образцов для проведения статистического анализа и проектирования. Исследования по определению точного влияния объема испытательного образца на распределение прочности для КМКМ не были завершены. Следует отметить, что значения кольцевой прочности на растяжение, полученные с использованием различных рекомендованных испытательных образцов с различным объемом материала в расчетном участке, могут различаться из-за влияния объема.

5.5 Испытания на кольцевую прочность на растяжение обеспечивают информацию о прочности и деформации материалов под действием двухосевого напряжения под действием внутреннего давления в трубе. В испытаниях подобного типа присущи неравномерные напряженные состояния, поэтому при последующей оценке любого нелинейного напряженно-деформированного состояния необходимо учесть несимметричное поведение КМКМ под действием двухосевых напряжений. Подобное нелинейное поведение может развиться в результате протекания процессов суммарного повреждения (например, растрескивание матрицы, нарушение сцепления между матрицей и волокном, разрыв волокна, расслоение и т. д.), на что могут оказать влияние режим испытания, скорость испытания, эффекты обработки или воздействия окружающей среды. Некоторые из этих эффектов могут быть последствиями коррозионного растрескивания или докритического (медленного) роста трещин, которые можно минимизировать, проводя испытание при достаточно высоких скоростях в соответствии с данным методом испытаний.

5.6 Результаты испытаний на кольцевую прочность на растяжение испытательных образцов, изготовленных в соответствии со стандартизованными размерами из конкретного материала или из выбранных частей, могут не полностью давать представление о прочностных и деформационных свойствах полноразмерного, целого конечного продукта или о его поведении в процессе эксплуатации в различных окружающих условиях.

5.7 С целью контроля качества результаты, полученные при испытании стандартизованных трубчатых испытательных образцов на кольцевую прочность на растяжение, могут считаться свидетельствующими о поведении материала, из которого они были отобраны, о заданных основных условиях обработки и последующей термообработке.

5.8 Поведение при кольцевом растягивающем напряжении и прочность КМКМ зависит от присущего КМКМ сопротивления разрыву, наличия дефектов или процессов накопления повреждений или от того и другого. Настоятельно рекомендуется выполнить анализ поверхностей разрыва и фрактографию, хотя это лежит за пределами данного метода испытаний.

**ДБ.3**

6.2 Хотя подготовку поверхности испытательных образцов обычно не рассматривают в качестве серьезной проблемы для КМКМ, она может привести к возникновению дефектов, которые могут оказывать резко выраженное влияние на механические свойства и поведение материала в отношении кольцевой прочности на растяжение (например, на форму и уровень результирующей кривой «напряжение/деформация», кольцевую прочность на растяжение и деформацию растяжения, предел пропорциональности напряжения и деформации и т. д.). Дефекты механической обработки, возникшие при подготовке испытательного образца, могут быть как случайным фактором воздействия при определении предельной прочности материала в идеальном состоянии (то есть более частое возникновение разрывов, инициированных с поверхности, по сравнению с разрывами, инициированными из объема), так и неотъемлемой частью измеряемых прочностных характеристик. Подготовка поверхности также может привести к возникновению остаточных напряжений. Не существует универсальных или стандартизированных методов подготовки поверхности. Следует понимать, что окончательные шаги по механической обработке могут нейтрализовать дефекты механической обработки, появившиеся при первичной обработке, но могут и не позволить этого. Таким образом, история изготовления испытательного образца может сыграть важную роль в измеренном распределении прочности и должна быть внесена в протокол. Кроме того, способ изготовления, использованный для определенных композитных материалов (например, химическая инфильтрация из паровой фазы или горячее прессование), может потребовать проведения испытаний испытательных образцов в обработанном состоянии (иными словами, может отсутствовать возможность проведения механической обработки поверхностей испытательного образца).

6.3 Испытания труб из КМКМ под действием внутреннего давления могут генерировать двух- и трехосевое распределение напряжений с максимальными и минимальными значениями напряжений, возникающих на поверхности испытательного образца и приводящих к разрывам, инициируемым на поверхности или вблизи от точек геометрических переходов. Кроме того, если деформации измеряют на поверхностях, где встречаются максимальные или минимальные напряжения, то эффект изгиба может повлечь за собой неверное измерение деформаций, зависящее от расположения тензометра на образце. Подобным образом развитие разрыва с поверхностных дефектов может быть усилено или подавлено благодаря наличию неравномерных напряжений, вызванных изгибом.

6.4 Трение между вставкой и грубой и/или несмазанной внутренней поверхностью трубчатого испытательного образца может привести к возникновению сжимающих напряжений на внутреннем проходном канале трубы, которые будут снижать кольцевое напряжение в трубе. Кроме того, такое трение усиливает продольное изгибающее напряжение.

**ДБ.4**

**8. Факторы риска**

8.1 Во время проведения данного метода испытаний присутствует высокая возможность появления летающих фрагментов разрушенного испытательного материала. Хрупкая природа высококачественной керамики и выделение энергии деформации является одной из причин потенциального появления неуправляемых фрагментов при разрушении. Настоятельно рекомендуется принимать меры для локализации и сохранения таких фрагментов для последующей фрактографической реконструкции и анализа.

8.2 Открытые волокна на кромках испытательных образцов из КМКМ представляют опасность из-за остроты и хрупкости керамического волокна. Все, кто будут работать с такими материалами, должны быть хорошо информированы об этих условиях и о правильных методах работы.

**ДБ.5**

9.1 Геометрия испытательного образца

9.1.1 Общая информация. Геометрия трубчатого испытательного образца зависит от конечного использования данных по кольцевой прочности на растяжение. Например, если требуется кольцевая прочность на растяжение изготовленного элемента, то размеры получившегося испытательного образца могут отражать ограничения по толщине стенки, диаметру трубы и длине элемента. Если необходимо оценить влияние взаимодействий различных составляющих материалов для конкретного КМКМ, произведенного с помощью конкретной технологической схемы, тогда размер испытательного образца и получившегося расчетного участка (то есть длина вставки или длина участка, находящегося под давлением) будут отражать объем, который необходимо отобрать в виде образца. Кроме того, рассчитанная длина вставки (то есть длина участка, находящегося под давлением) плюс длина нажимных стержней (то есть длина участка, находящегося не под давлением) будут влиять на окончательную геометрию испытательного образца. Геометрии трубчатых испытательных образцов, используемых для максимального увеличения или уменьшения напряжений в толщине стенки, были исследованы экспериментально и аналитически (1, 2, 3).

9.1.1.1 В следующих разделах обсуждаются необходимые размеры трубчатых испытательных образцов для испытания на кольцевую прочность на растяжение, хотя любая геометрия приемлема, если она удовлетворяет требованиям данного метода испытаний по размерам нажимных стержней и испытательного образца, а также расположению разрыва. Отклонения от рекомендованных геометрий могут быть необходимы в зависимости от конкретного оцениваемого КМКМ. Необходимо провести анализы напряжений неиспытанных испытательных образцов, чтобы убедиться, что концентрации напряжений, которые могут привести к нежелательным разрушениям за пределами расчетного участка, не существуют. Следует отметить, что образцы определенной формы по своей природе содержат присущие им концентрации напряжений из-за геометрических переходов, которые добавляют свой эффект к напряжению из-за конечной длины эластомерных вставок. Анализы напряжений могут показать величину таких концентраций напряжений, показывая при этом успешное создание близкого к равномерному кольцевого напряженного растягивающего состояния в расчетном участке испытательного образца.

9.1.2 Размеры испытательного образца. Хотя диаметры и толщина стенки труб из КМКМ могут широко варьироваться в зависимости от применения, в результате аналитических и экспериментальных исследований было показано (1, 2, 3), что успешность испытаний будет максимально повышена при использовании труб с полной длиной из следующего диапазона

$$L_t \geq 16/\beta. \quad (4)$$

**ДБ.6**

9.4 Валидационное испытание. Валидационное индивидуальное испытание представляет собой испытание, которое удовлетворяет всем последующим требованиям данного метода испытаний с окончательным разрушением в равномерно напряженном расчетном участке (то есть длина вставки под давлением) за исключением случаев, когда испытания, сопровождающиеся разрывом за пределами расчетного участка, интерпретируются в качестве прерванных испытаний с целью анализов усеченных испытаний.

**ДБ.7**

10.1 Размеры испытательного образца. Определяют толщину стенки и наружный диаметр расчетного участка каждого испытательного образца с точностью до 0,02 мм. Выполняют измерения как минимум в трех плоскостях поперечного сечения расчетного участка. Во избежание повреждения критически важной области расчетного участка рекомендуется выполнять измерения оптическими методами (например, оптическим компаратором) или механически с помощью самоограничивающегося (фрикционный или храповый механизм) плоского микрометра с пяткой. Для измерения размеров между ткаными поверхностями тканых материалов в основном используют самоограничивающийся (фрикционный или храповый механизм) плоский микрометр с пяткой с размерами поперечного сечения минимум 5 мм. Во всех случаях разрешение инструмента должно соответствовать установленному в разделе 7.5. Соблюдайте осторожность для предотвращения повреждения расчетного участка испытательного образца. Использование микрометров со сферическим наконечником или с острой кромкой может быть предпочтительно при измерении испытательных образцов малого диаметра или материалов с шероховатыми или неравномерными неткаными поверхностями. Фиксируют и вносят в протокол измеренные размеры и местоположение точек измерения для использования при расчете кольцевого растягивающего напряжения. Используют среднее значение нескольких измерений при расчетах напряжения.

10.1.1 Как вариант, чтобы избежать повреждений на расчетном участке (или в случаях, когда невозможно спрогнозировать или определить толщину стенки на расчетном участке), используют процедуры, описанные в разделе 9.1, чтобы выполнить измерения размеров на расчетном участке после разрушения. Обратите внимание, что в некоторых случаях процесс разрушения может привести к сильному фрагментированию расчетного участка в непосредственной близости от точки разрушения, затрудняя, таким образом, выполнение измерений после разрушения. В таких случаях рекомендуется следовать процедурам предварительных измерений, описанным в разделе 9.1, для обеспечения надежных результатов измерений.

10.1.2 Периодически или даже в объеме 100 % проводят инспекции/измерения всех испытательных образцов и размеров испытательных образцов, чтобы обеспечить соответствие техническим условиям на чертежах. Как правило, если оборудование соответствует техническим условиям из раздела 7.5, для этого подходят оптические методы высокого разрешения (например, оптический компаратор) или цифровые точечные методы высокого разрешения (например, координатно-измерительная машина). Обратите внимание, что частота разрушений на расчетном участке и изгиб на расчетном участке зависят от правильных габаритных размеров испытательного образца в пределах требуемых допусков.

10.1.3 В некоторых случаях желательно, но не обязательно замерять чистоту обработки поверхности, чтобы количественно оценить состояние поверхности. Для определения шероховатости поверхности параллельно продольной оси можно использовать такие методы, как контактная профилометрия. После выполнения количественной оценки шероховатость поверхности следует занести в протокол.

**ДБ.8**

11.3 В Разделах 11.4—11.15 приведены опциональные методы отбора и обработки данных, основанные на допущении, что расчеты напряжений были выполнены для условно изотропического, гомогенного, линейно-упругого материала, что может не соответствовать трубам из КМКМ.

11.4 *Кольцевое растягивающее напряжение.* Исходя из допущения, что материал изотропический, гомогенный и линейно-упругий, кольцевое растягивающее напряжение на внутренней стенке вычисляют по формуле

$$\sigma_h = \eta_m p \frac{2\left(r_i^{\text{tube}}\right)^2}{\left[\left(r_0^{\text{tube}}\right)^2 - \left(r_i^{\text{tube}}\right)^2\right]}, \quad (10)$$

где $\sigma_h$ — кольцевое растягивающее напряжение, МПа;
$p$ — внутреннее давление, Н/мм$^2$;
$\eta_m$ — максимальный фактор напряжений (см. приложение Х2);
$r_i^{\text{tube}}$ — внутренний радиус трубы, мм;
$r_0^{\text{tube}}$ — наружный радиус трубы, мм.

Фактор напряжений, $\eta_m$, представляет собой поправочный коэффициент для учета разницы между аналитическими численными и экспериментальными результатами по кольцевым растягивающим напряжениям в трубах, полученными при нагнетании давления на внутреннюю эластомерную вставку.

11.5 *Кольцевая деформация при растяжении.* Если значение деформации не получено напрямую с тензодатчиков деформаций, то кольцевую деформацию при растяжении вычисляют по формуле

$$\varepsilon_h = \frac{2\Delta r}{2r_0^{\text{tube}}}, \quad (11)$$

где $\varepsilon_h$ — кольцевая деформация при растяжении, мм/мм;
$\Delta r$ — изменение радиуса, мм;
$r_0^{\text{tube}}$ — наружный радиус трубы, мм.

Для образцов с тензодатчиками соответствующие значения деформации получают напрямую без измерения удлинения расчетного участка.

11.5.1 Обратите внимание, что в некоторых случаях начальный участок кривой «напряжение — деформация» ($\sigma_h$ — $\varepsilon_h$) показывает нелинейную область или «пик» с последующей линейной областью. Этот пик может являться искажением от испытательного образца или условий испытания и поэтому не может представлять собой отражение свойства материала. Кривая ($\sigma_h$ — $\varepsilon_h$) может быть скорректирована по пику путем продления линейной области кривой до точки нулевого напряжения на оси деформации. Точка пересечения этой продленной линии с осью деформации представляет собой величину коррекции пика, которая вычитается из всех значений деформации, превышающих деформацию коррекции пика. Результирующую кривую ($\sigma_h$ — $\varepsilon_h$) используют для всех последующих расчетов.

**ДБ.9**

**13 Прецизионность и ошибки**

13.1 Поведение керамического композитного материала в отношении кольцевой прочности на растяжение не является детерминистическим, но различается для различных трубчатых испытательных образцов. Причинами такой вариативности являются присущие вариации в керамических композитных материалах, изготовленных на основе керамической матрицы и армирования керамическим волокном. Переменные факторы включают в себя вариации свойств волокон, матрицы и поверхности раздела фаз, а также изменения структуры, объемной доли усиления и насыпной плотности композитного материала. Такие вариации могут встречаться в конкретном испытательном образце, а также между различными испытательными образцами.

13.2 Из-за природы материалов и нехватки широкой базы данных о разнообразии труб из композитных материалов на основе высококачественной керамики, подвергающихся действию внутреннего давления, на настоящий момент нельзя сделать окончательное утверждение касательно прецизионности и ошибок испытательных процедур из данного метода испытаний.

**ДБ.10**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Х1. Проверка выравнивания нагрузочной рамы**

Х1.1 *Цель проверки.* Целью данной проверочной процедуры является демонстрация того, что сжимающая испытательная установка может использоваться оператором без превышения предельного изгиба в процентах. Таким образом, данная проверочная процедура не должна требовать большего внимания к испытательной установке, чем при стандартном испытании испытательного образца на сжатие. Изгиб под действием сжимающей нагрузки должен быть измерен с помощью нажимных стержней, оборудованных измерительной аппаратурой. Выполняют проверочные измерения в начале и конце серии испытаний с рекомендуемым измерением в середине серии всегда, когда фиксаторы и соединения нагрузочной рамы устанавливают на другую испытательную машину, всегда, когда серию испытаний выполняет другой оператор, всегда, когда предполагается наличие повреждения или смещения.

Х1.2 Для упрощения устанавливают минимум четыре фольговых тензодатчика сопротивления на проверочный нажимной стержень, как показано на рисунке Х1.1. Обратите внимание, что плоскость тензодатчика должна

быть в пределах 0,5 мм от продольного центра назначенного расчетного участка. Избегают установки тензодатчиков ближе, чем одна длина тензодатчика от геометрических особенностей, которые могут вызвать концентрации напряжений и неточности измерений деформации равномерного расчетного участка. Тензодатчики нажимных стержней, состоящих из изотропических гомогенных материалов, должны быть максимально узкими для минимизации усреднения деформации. Равномерно располагают четыре тензодатчика (под углом 90°) вокруг расчетного участка.

X1.3 *Процедура проверки.* Процедуры проверки выравнивания подробно описаны в АСТМ Е 1012. Однако самые важные моменты, касающиеся кольцевого поперечного сечения, описаны здесь для акцентирования. Следующее обсуждение направлено не на замену АСТМ Е 1012, а, скорее, на объяснение тех аспектов, которые напрямую применимы к данному конкретному методу испытаний.

X1.3.1 Размещают нажимной стержень и фиксаторы испытательной машины.

X1.3.2 Подсоединяют выводные провода тензодатчиков к кондиционирующему оборудованию и позволяют тензодатчикам уравновеситься под напряжением в течение как минимум 30 мин. перед выполнением проверочных испытаний. Это минимизирует смещение характеристик во время фактического проведения проверки.

X1.3.3 Устанавливают на ноль датчики деформации перед приложением любой предварительной нагрузки к нажимному стержню. Это позволяет зарегистрировать любой изгиб, вызванный сжимающим приспособлением.

X1.3.4 Прикладывают небольшую предварительную нагрузку к нажимному стержню для стабилизации его в сжимающем приспособлении.

X1.3.5 Прикладывают достаточную нагрузку к нажимному стержню для достижения средней деформации, равной половине предполагаемой деформации при разрушении испытательного материала, или деформации –0,0005 (иными словами, микродеформации –500), в зависимости от того, что больше. Желательно регистрировать деформацию (и, следовательно, изгиб в процентах) в зависимости от приложенной нагрузки для контроля любого самовыравнивания нагрузочной рамы.

X1.3.6 Вычисляют изгиб в процентах, обращаясь к рисунку X1.1 для определения номеров тензодатчиков. Изгиб, %, вычисляют по формуле

$$PB = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_0} 100, \tag{X1.1}$$

$$\varepsilon_b = \left[ \left( \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2} \right)^2 + \left( \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_4}{2} \right)^2 \right]^{1/2}, \tag{X1.2}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4}{4}, \tag{X1.3}$$

где $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$ и $\varepsilon_4$ — показания величины деформации для отдельных тензодатчиков.

Показания датчиков деформации — в единицах измерения деформации, а деформации сжатия — отрицательные.

X1.3.7 Направление максимальной деформации изгиба вычисляют по формуле

$$\theta = \arctan \left[ \frac{\varepsilon(\text{next greatest of } 1,2,3,4) - \varepsilon_0}{\varepsilon(\text{greatest of } 1,2,3,4) - \varepsilon_0} \right], \tag{X1.4}$$

где $\theta$ измеряют от датчика деформации с наибольшим показанием в направлении датчика деформации со следующим по величине показанием, где направление против часовой стрелки положительное, как видно на виде сверху.

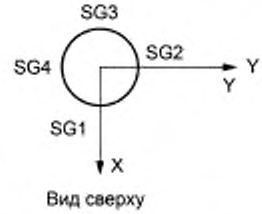
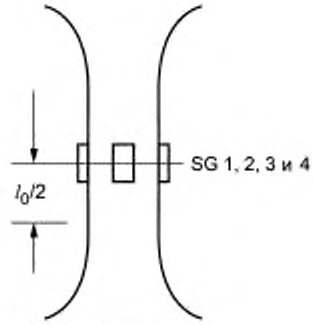



Рисунок X1.1, лист 1 — Иллюстрация расположения тензодатчиков на плоскости расчетного участка и нумерации тензодатчиков ($l_0$ — длина расчетного участка, SG — тензодатчик)




Вид спереди

Рисунок X1.1, лист 2

X1.3.8 Влияние изгиба нажимного стержня может быть проверено путем поворота стержня на 180° вокруг его продольной оси и выполнения повторной проверки на изгиб. Если при каждом повороте получают аналогичные результаты, то степень выравнивания можно рассматривать характерной для нагрузочной рамы и не указывающей на испытательный образец. Если выравнивание нагрузочной рамы находится в пределах технических условий, то максимальный изгиб в процентах должен быть отражен в протоколе, а испытания на сжатия можно проводить. Если выравнивание нагрузочной рамы находится за пределами технических условий, тогда нагрузочная рама должна быть выравнена или отрегулирована в соответствии со специальными процедурами, уникальными для каждой индивидуальной испытательной установки. Данная процедура проверки должна быть повторена для подтверждения достигнутого выравнивания.

**ДБ.11**

**ПРИЛОЖЕНИЕ X2. Коэффициенты напряжений для расчета максимального кольцевого напряжения**

X2.1 Анализ свободно подвешенной трубы под давлением предполагает, что концы трубы, находящиеся не под давлением, бесконечно длинны. Эффекты действия давления на центральный участок длины трубы приведены далее.

X2.1.1 Кольцевое напряжение различается по длине трубы, находящейся под давлением.

X2.1.2 Изгибающие напряжения встречаются в продольном направлении.

X2.1.3 Касательные напряжения действуют под прямым углом к оси.

X2.1.4 Сжимающие напряжения из-за давления действуют только на участок трубы под давлением.

X2.2 Несмотря на комплексную систему напряжений, кольцевое напряжение остается наибольшим из всех напряжений. Максимальное кольцевое напряжение является функцией только диаметров трубы и коэффициентов Пуассона испытательного материала для внутреннего давления следующим образом.

X2.2.1 На наружном радиусе участка трубы под давлением кольцевое напряжение вычисляют по формуле

$$\sigma_h = \eta_m p \frac{2\left(r_i^{\text{tube}}\right)^2}{\left[\left(r_0^{\text{tube}}\right)^2 \quad \left(r_i^{\text{tube}}\right)^2\right]}, \qquad \text{(X2.1)}$$

где $\sigma_h$ — кольцевое растягивающее напряжение, МПа;

$p$ — внутреннее давление, Н/мм$^2$;

$\eta_m$ — максимальный фактор кольцевого напряжения = [1 – 1/2 (θ (β $m$) + θ (β $n$))] + ν$\sigma_x$ [см. рисунки X2.1 и (1)];

$r_i^{\text{tube}}$ — внутренний радиус трубы, мм;

$r_0^{\text{tube}}$ — наружный радиус трубы, мм;

$\sigma_x$ — продольное растягивающее напряжение, МПа.

X2.2.2 На внутреннем радиусе участка трубы под давлением кольцевое напряжение вычисляют по формуле

$$\sigma_h = \lambda_m p \frac{\left[\left(r_0^{\text{tube}}\right)^2 + \left(r_i^{\text{tube}}\right)^2\right]}{\left[\left(r_0^{\text{tube}}\right)^2 - \left(r_i^{\text{tube}}\right)^2\right]}, \qquad \text{(X2.2)}$$

где $\sigma_h$ — кольцевое растягивающее напряжение, МПа;

$p$ — внутреннее давление, Н/мм$^2$;

$\lambda_m$ — максимальный фактор кольцевого напряжения $= \left[1 - \frac{1}{2}\left(\theta(\beta m) + \theta(\beta n)\right)\right] - p\frac{\nu}{2}\left(\theta(\beta m) + \theta(\beta n)\right) + \nu\sigma_x$ [см. рисунки X2.1 и (1)];

$r_i^{\text{tube}}$ — внутренний радиус трубы, мм;

$r_0^{\text{tube}}$ — наружный радиус трубы, мм;

$\sigma_x$ — продольное растягивающее напряжение, МПа.

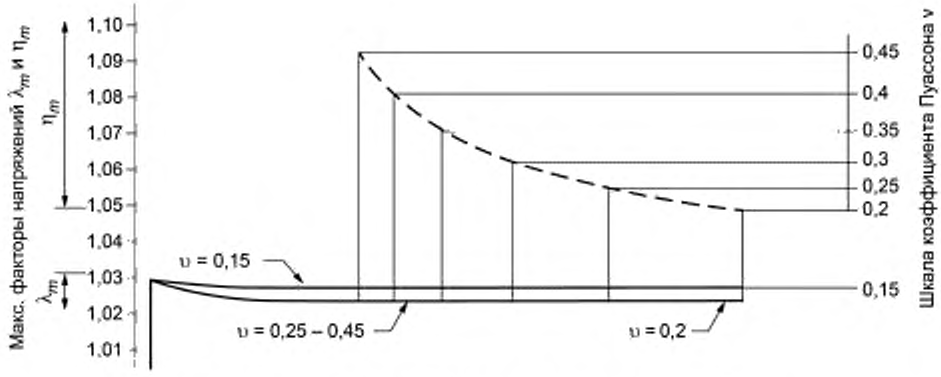



Рисунок Х2.1 График максимальных факторов напряжения $\lambda_m$ и $\eta_m$ для $1 \le a/h = r_i^{tube}/t \le 50$ при $0,15 \le \nu \le 0,45$ (1)

**ПРИЛОЖЕНИЕ Х3. Зависимость внутреннего давления от продольного усилия**

Х3.1 Давление, создаваемое на внутренней поверхности испытательного образца, связано с приложенным напряжением в испытательном материале (2). Продольная деформация во вставке связана с упругими свойствами материала вставки, продольным и радиальным напряжением (то есть внутренним давлением) следующим образом для изотропического, линейно-упругого материала

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_{insert}}\left[\sigma_x - 2\nu_{insert}\sigma_r\right], \quad (X3.1)$$

где $\varepsilon_x$ — продольная нормальная деформация, мм/мм;
$E_{insert}$ — модуль упругости материала вставки, МПа (Н/мм$^2$);
$\sigma_x$ — продольное нормальное напряжение, МПа (Н/мм$^2$);
$\nu_{insert}$ — коэффициент Пуассона для материала вставки;
$\sigma_r$ — радиальное нормальное напряжение, МПа (Н/мм$^2$).

Х3.1.1 Для трубчатого испытательного образца со вставкой $\sigma_r = -p$, таким образом формула Х3.1 принимает вид

$$p = \frac{E_{insert}\varepsilon_x - \sigma_x}{2\nu_{insert}}. \quad (X3.2)$$

Х3.1.2 Для несжимаемого, линейно-упругого материала, такого как большинство эластомеров, $\nu_{insert} = 0,5$, и формула Х3.2 принимает вид

$$p = E_{insert}\varepsilon_x - \sigma_x \quad (X3.3)$$

где $\sigma_h$ — кольцевое растягивающее напряжение, МПа;
$p$ — внутреннее давление, Н/мм$^2$;
$\eta_m$ — максимальный фактор кольцевого напряжения = [1 – 1/2 (θ (β $m$) + θ (β $n$))] + ν$\sigma_x$ [см. рисунки Х2.1 и (1)];
$r_i^{tube}$ — внутренний радиус трубы, мм;
$r_0^{tube}$ — наружный радиус трубы, мм;
$\sigma_x$ — продольное растягивающее напряжение, МПа.

**Приложение ДВ**
**(справочное)**

## Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем стандарта АСТМ

Таблица ДВ.1

| Структура настоящего стандарта | Структура стандарта ASTM C 1819—15 |
|---|---|
| [1] | 3 Терминология |
| 3 Сущность метода (4) | 4 Краткое описание методики |
| [1] | 5 Значимость и применение |
| [2] | 6 Воздействия |
| 4 Оборудование (7) | 7 Аппаратура |
| [1] | 8 Факторы риска |
| 5 Подготовка к проведению испытания (9) | 9 Испытательные образцы |
| 6 Проведение испытания (10) | 10 Процедура испытания |
| 7 Обработка результатов (11) | 11 Расчет результатов |
| 8 Протокол испытания (12) | 12 Протокол |
| [3] | 13 Прецизионность и ошибки |
| [4] | 14 Ключевые слова |
| [1] | Приложения |
| Приложение ДА (справочное) Оригинальный текст модифицированных структурных элементов примененного стандарта АСТМ | — |
| Приложение ДБ (справочное) Оригинальный текст невключенных структурных элементов примененного стандарта АСТМ | — |
| Приложение ДВ (справочное) Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем стандарта АСТМ | — |

[1] Разделы (приложения) исключены, так как носят справочный характер.
[2] Положения раздела размещены в других разделах настоящего стандарта.
[3] Данный раздел исключен, так как в нем отсутствуют требования к точности, не указаны нормы погрешности и ее составляющих для данного метода испытаний.
[4] Данный раздел приведен в соответствие с требованиями ГОСТ Р 1.5 (подпункт 5.6.2).

Примечание — После заголовков разделов настоящего стандарта приведены в скобках номера аналогичных им разделов стандарта АСТМ.

УДК 666.3.017:006.354 ОКС 81.060.30

Ключевые слова: керамические композиты, предел прочности при кольцевом растяжении, нормальная температура, цилиндрические образцы с эластомерными вставками

**БЗ 12—2017/143**

Редактор *Е.В. Таланцева*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *Е.И. Рычкова*
Компьютерная верстка *Ю.В. Поповой*

Сдано в набор 23.11.2017 Подписано в печать 13.12.2017. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,34 Тираж 22 экз. Зак. 2559.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

ИД «Юриспруденция», 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 11
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru
Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123001, Москва, Гранатный пер., 4.
www.gostinfo.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru