МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
(МГС)

INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND CERTIFICATION
(ISC)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ 33685— 2015

КОМПОЗИТЫ ПОЛИМЕРНЫЕ

Метод определения удельной работы расслоения в условиях сдвига G_{IIC}

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2019

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели, основные принципы и общие правила проведения работ по межгосударственной стандартизации установлены ГОСТ 1.0 «Межгосударственная система стандартизации. Основные положения» и ГОСТ 1.2 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, обновления и отмены»

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» совместно с Открытым акционерным обществом «НПО Стеклопластик» и Объединением юридических лиц «Союз производителей композитов»

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

3 ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 12 ноября 2015 г. № 82-П)

За принятие проголосовали:

Краткое наименование страны по МК (ИСО 3166) 004—97	Код страны по МК (ИСО 3166) 004—97	Сокращенное наименование национального органа по стандартизации
Армения	AM	Минэкономики Республики Армения
Беларусь	BY	Госстандарт Республики Беларусь
Казахстан	KZ	Госстандарт Республики Казахстан
Киргизия	KG	Кыргызстандарт
Россия	RU	Росстандарт
Таджикистан	TJ	Таджикстандарт
Украина	UA	Минэкономразвития Украины

4 Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 ноября 2015 г. № 1975-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 33685—2015 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 января 2017 г.

5 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к стандарту ASTM D6671/D6671M—13 «Стандартный метод испытаний межслоевой вязкости разрушения по смешанной моде I + II для однонаправленных композитов с полимерной матрицей, армированных волокнами» («Standard Test Method for Mixed Mode I — Mode II Inter laminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites», MOD) путем внесения технических отклонений, изменения структуры, дополнений и исключения отдельных пунктов.

Положения примененного стандарта ASTM, которые приняты в настоящем стандарте с модификацией их содержания, приведены в дополнительном приложении ДА.

Положения, разделы и пункты примененного стандарта ASTM, не включенные в основную часть настоящего стандарта, приведены в дополнительном приложении ДБ.

Сравнение структуры стандарта ASTM со структурой настоящего стандарта приведено в дополнительном приложении ДВ.

Текст измененных положений, элементов выделен в стандарте одиночной вертикальной полужирной линией на полях слева (четные страницы) или справа (нечетные страницы) от соответствующего текста.

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного стандарта ASTM в целях соблюдения принятой терминологии

6 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

7 ПЕРЕИЗДАНИЕ. Октябрь 2019 г.

Информация о введении в действие (прекращении действия) настоящего стандарта и изменений к нему на территории указанных выше государств публикуется в указателях национальных стандартов, издаваемых в этих государствах, а также в сети Интернет на сайтах соответствующих национальных органов по стандартизации.

В случае пересмотра, изменения или отмены настоящего стандарта соответствующая информация будет опубликована на официальном интернет-сайте Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации в каталоге «Межгосударственные стандарты»

© Стандартинформ, оформление, 2016, 2019

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

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 1
4 Сущность метода 2
5 Оборудование 2
6 Образцы 3
7 Проведение испытаний 4
8 Обработка результатов 5
9 Протокол испытаний 6
Приложение ДА (справочное) Положения примененного стандарта ASTM, которые приняты в настоящем стандарте с модификацией их содержания 7
Приложение ДБ (справочное) Положения примененного стандарта ASTM, не включенные в основную часть настоящего стандарта 15
Приложение ДВ (справочное) Сравнение структуры стандарта ASTM со структурой межгосударственного стандарта 20

М Е Ж Г О С У Д А Р С Т В Е Н Н Ы Й С Т А Н Д А Р Т

КОМПОЗИТЫ ПОЛИМЕРНЫЕ

Метод определения удельной работы расслоения в условиях сдвига G_{IIC}

Polymer composites. Test method for determination of the interlaminar fracture toughness under shear G_{IIC}

Дата введения — 2017—01—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на слоистые полимерные композитные материалы (ПКМ), армированные непрерывными волокнами, и устанавливает метод испытания на расслоение ПКМ сдвигом G_{IIC} при изгибе образца в виде балки с трещиной с определением удельной работы расслоения в условиях сдвига (мода II).

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие межгосударственные стандарты:

ГОСТ 1.5—2001 Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению

ГОСТ 166 (ИСО 3599—76) Штангенциркули. Технические условия

ГОСТ 6507 Микрометры. Технические условия

ГОСТ 12423 (ISO 291:2008) Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)

ГОСТ 24888 Пластмассы, полимеры и синтетические смолы. Химические наименования, термины и определения

ГОСТ 28840 Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования

ГОСТ 32794 Композиты полимерные. Термины и определения

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов и классификаторов на официальном интернет-сайте Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации (gost.e-ecolog.ru ю указателям национальных стандартов, издаваемым в государствах, указанных в предисловии, или на официальных сайтах соответствующих национальных органов по стандартизации. Если на документ дана недатированная ссылка, то следует использовать документ, действующий на текущий момент, с учетом всех внесенных в него изменений. Если заменен ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то следует использовать указанную версию этого документа. Если после принятия настоящего стандарта в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение применяется без учета данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 24888, ГОСТ 32794, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **диаграмма деформирования:** Графическая зависимость между напряжением (нагрузкой) и деформацией (перемещением).

Издание официальное

3.2 **скорость испытания *V*, мм/мин:** Скорость движения активной траверсы испытательной машины.

3.3 **удельная работа расслоения (вязкость межслойного разрушения) при продольном сдвиге G_{II} (мода II), Дж/мм^2:** Предел отношения изменения упругой энергии, накопленной в образце в виде двухконсольной балки при его нагружении изгибом, к бесконечно малому приращению площади межслойной трещины.

3.4 **критическая нагрузка P_C, Н:** Нагрузка, определяемая по диаграмме деформирования одним из трех способов (рисунок 1):

- как нагрузка, равная нагрузке начала отклонения диаграммы от линейной, $P_{нл}$;
- как нагрузка, равная нагрузке в момент страгивания трещины (момент страгивания трещины определяется визуально), $P_{виз}$;
- как нагрузка, равная нагрузке в точке пересечения прямой, выходящей из начала координат, тангенс угла которой на 5 % меньше тангенса угла линейного участка диаграммы, $P_{5\,\%}$.

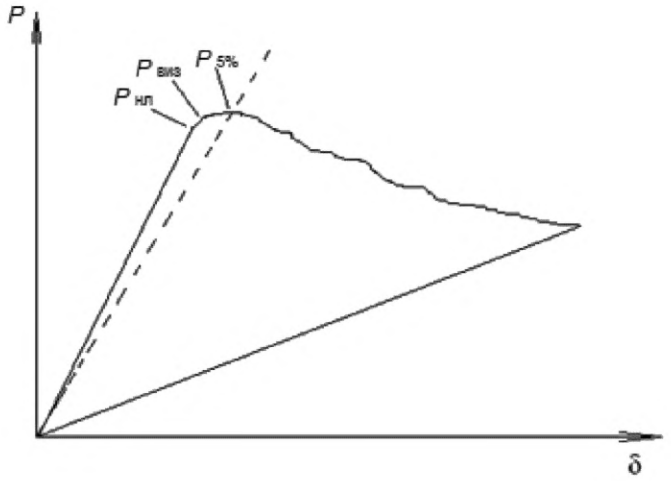


Рисунок 1 — Типовая диаграмма нагрузка — перемещение

3.5 **удельная работа расслоения G_{IIC}, Дж/мм^2:** Работа расслоения, равная величине G_{II} при критической нагрузке P_C.

4 Сущность метода

4.1 Сущность метода заключается в испытании с постоянной скоростью нагружения на трехточечный изгиб образца в виде балки, на конце которой предварительно выполнено расслоение, расположенное по центру толщины. При испытании фиксируют прикладываемое усилие, перемещение центральной опоры и длину трещины.

4.2 Удельную работу расслоения (вязкость межслойного разрушения) при продольном сдвиге G_{II} (мода II), Дж/мм^2, определяют как отношение изменения упругой энергии, накопленной в образце в виде двухконсольной балки при его нагружении, к бесконечно малому приращению площади межслойной трещины по формуле

$$G_{II} = -\frac{1}{b}\frac{dU}{da}, \qquad (1)$$

где U — энергия, накопленная в образце, Дж;

b — ширина образца, мм;

a — длина трещины расслоения, определяемая как расстояние от боковой опоры до вершины трещины, мм.

5 Оборудование

5.1 Испытания проводят на испытательной машине, отвечающей требованиям ГОСТ 28840, обеспечивающей линейное перемещение с заданной постоянной скоростью активного захвата

(траверсы) в диапазоне от 0,5 до 5 мм/мин и измерение нагрузки с погрешностью не более 1 % измеряемой величины.

5.2 Испытательная машина должна быть оснащена приспособлением для проведения испытания на трехточечный изгиб. Радиус скругления опор должен составлять от 4 до 6 мм.

5.3 Для фиксирования прогиба образца при испытании используют датчики перемещения. В качестве датчиков перемещения используют механические, оптические экстензометры или другие приборы, обеспечивающие измерение перемещения (прогиба) с максимальной относительной погрешностью не более 0,5 % измеряемой величины. *Установка датчика прогиба не должна создавать дополнительных нагрузок на образец.* Измерение деформации проводят под нагружающей опорой.

5.4 Контроль перемещения (прогиба) можно осуществлять по перемещению активной траверсы, *при условии, что жесткость машины (силовой цепочки) значительно выше жесткости образца.*

5.5 Запись данных перемещения (прогиба) проводят с частотой не менее 5 Гц.

5.6 Погрешность средств измерений должна быть не более 1 % измеряемой величины. Для измерений толщины используют микрометр по ГОСТ 6507 с погрешностью не более 0,005 мм, для измерения ширины — штангенциркуль по ГОСТ 166 с погрешностью не более 0,025 мм. Длину трещины (начальную и в ходе испытания) измеряют на боковой поверхности образца с погрешностью не более 0,5 мм подвижным инструментальным микроскопом или иным оптическим прибором. При измерении по неровным поверхностям, например по формованным поверхностям ПКМ, используют микрометр со сферическими измерительными губками радиусом от 4 до 6 мм; при измерении по гладким механически обработанным поверхностям или резам используют измерительные инструменты с плоскопараллельными губками.

5.7 Все используемое оборудование должно быть аттестовано и иметь соответствующие свидетельства поверки и сертификаты калибровки.

6 Образцы

6.1 Для испытаний применяют образцы однонаправленного ПКМ с четным числом слоев в виде полосы прямоугольного сечения (см. рисунок 2) длиной не менее 140 мм, шириной от 20 до 25 мм и толщиной от 3 до 7 мм (рекомендуемая длина — 200 мм, ширина — 25 мм, толщина — 5 мм). Разность толщины образца по всей длине не должна превышать 0,1 мм, ширины — 0,2 мм.

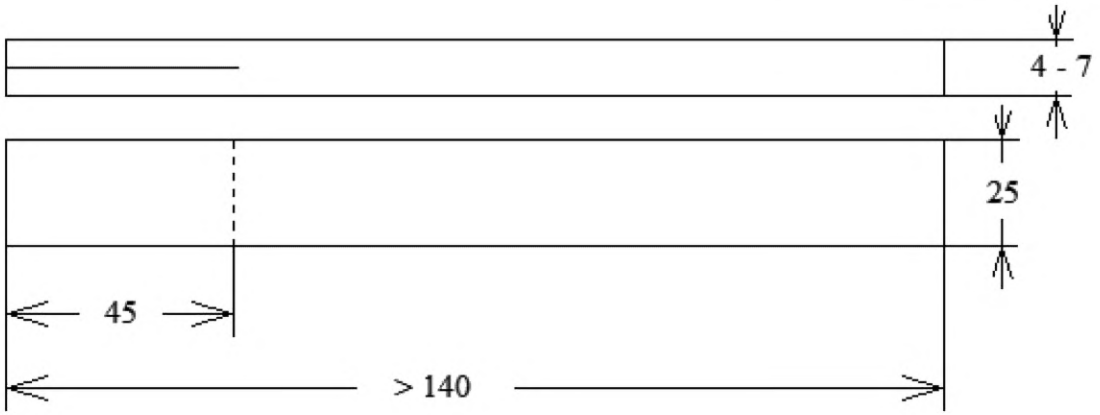


Рисунок 2 — Эскиз образца в форме двухконсольной балки

6.2 На одном конце образца по середине толщины при изготовлении создают начальную трещину расслоения длиной *a* от 45 до 55 мм, для чего в процессе изготовления образца закладывают полимерную пленку. Для композитов с эпоксидной матрицей, отвержденных при относительно низких температурах не более 177 °С или ниже, рекомендуется тонкая пленка, сделанная из политетрафторэтилена. Для композитов с полиимидной, бисмалеимидной или термопластиковой матрицей, которые изготовляются при относительно высоких температурах не более 177 °С, рекомендуется тонкая полиимидная пленка. Перед вводом полиимидной пленки в слоистый материал ее необходимо окрасить или сбрызнуть спреем, содержащим смазку для пресс-форм. Толщина пленки должна быть не более 13 мкм.

Число слоев ПКМ по обе стороны от трещины расслоения по мере ее роста должно быть постоянное.

Начальная длина трещины от торца образца должна быть (45 ± 1) мм.

6.3 На образцах не должно быть трещин, надрезов, неровностей, шероховатых поверхностей, расслоений, заусенцев и других дефектов, заметных невооруженным глазом.

6.4 При резке, фрезеровке и шлифовке образцов используют смазочно-охлаждающие жидкости, не оказывающие влияния на свойства испытуемого ПКМ.

6.5 Образцы изготовляют путем формования в отдельных пресс-формах или вырезают из однородных по толщине плоских панелей или других полуфабрикатов. Вырезку образцов проводят в направлениях главных осей ортотропии испытуемого материала. Способ и режим изготовления образцов устанавливают в нормативных документах или технической документации на материал [технология изготовления образцов ПКМ (панелей) должна совпадать с технологией изготовления самого изделия].

6.6 Изготовленные образцы маркируют по разные стороны от расслоения номером партии и порядковым номером образца в партии. Маркировка должна позволять точно идентифицировать образцы. Она не должна повреждаться при испытании, а также влиять на результаты испытаний.

6.7 Количество образцов, необходимых для определения одной характеристики в заданном направлении одной партии ПКМ при заданном режиме испытаний, должно быть не менее пяти.

6.8 Любые отклонения от условий, указанных в 6.1—6.7, должны быть отражены в протоколе испытаний.

7 Проведение испытаний

7.1 Если в нормативном документе или технической документации на испытуемые материалы не указаны особые условия кондиционирования, то перед испытанием образцы кондиционируют при атмосферном давлении от 86 до 106 кПа, температуре (23 ± 2) °С и относительной влажности (50 ± 10) % не менее 90 ч по ГОСТ 12423.

Примечание — См. ДА.5 (приложение ДА).

7.2 Толщину образца измеряют микрометром с точностью до ± 0,01 мм, ширину — штангенциркулем с точностью до ± 0,05 мм. Измерения проводят в трех местах, на длине предполагаемого роста трещины (за результат принимают среднее значение). Результаты измерений округляют до трех значащих цифр и заносят в протокол испытаний. Подвижным инстументальным микроскопом измеряют длину трещины на боковой поверхности с двух сторон образца с точностью ± 0,5 мм. За расчетное значение длины трещины принимают среднеарифметическое значение двух показаний. Длина трещины с обеих сторон образца не должна различаться более чем на 2 мм. *При невыполнении этого условия соответствующую информацию заносят в протокол испытаний.*

7.3 Проводят входной контроль образцов по геометрическим размерам и внешнему виду. В случае несоответствия образцов требованиям настоящего стандарта составляют *акт входного контроля образцов, в котором для каждого образца, не прошедшего контроль, указывают маркировку, геометрические размеры, результаты визуального осмотра и пункт настоящего стандарта, которому не соответствует образец.*

7.4 Проведение испытаний образцов, не прошедших входной контроль, возможно с обязательным указанием в протоколе испытаний пунктов настоящего стандарта, которым не соответствуют образцы.

7.5 Испытания проводят в помещении при температуре и относительной влажности окружающего воздуха, указанных в технической документации на испытуемый материал. Если таких указаний нет, то испытания проводят при температуре окружающего воздуха (23 ± 2) °С, относительной влажности воздуха (50 ± 10) %.

7.6 Каждый образец калибруют по податливости на нагрузках, не превышающих нагрузку страгивания (начала роста) трещины. *Для этого образец устанавливают в приспособлении для трехточечного изгиба так, чтобы длина трещины составляла попеременно 15, 20, 25, 35 и 40 мм.* Для каждого положения со скоростью деформирования от 0,5 до 2 мм/мин записывают линейный участок диаграммы деформирования. Для каждой длины трещины вычисляют податливость образца C, мм/Н, по формуле

$$C = \frac{\delta}{P}, \qquad (2)$$

где δ — перемещение нагружающей опоры, мм;

P — усилие, Н.

Методом наименьших квадратов определяют коэффициенты C_0 и m для уравнения (см. рисунок 4).

$$C = ma^3 + C_0. \quad (3)$$

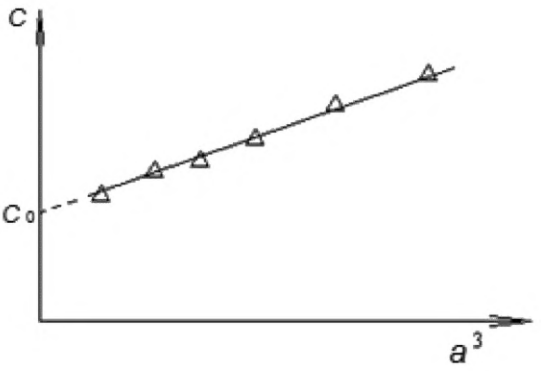


Рисунок 4 — Зависимость податливости образца от длины трещины

7.7 Образец устанавливают в приспособление для трехточечного изгиба так, чтобы длина трещины от центра одной из опор составляла 25 мм (рисунок 5).

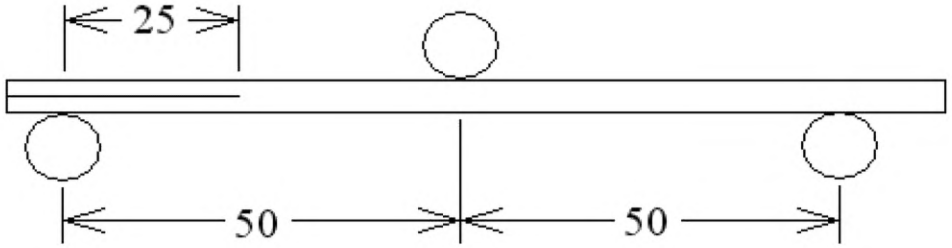


Рисунок 5 — Начальное положение образца на испытательной оснастке

7.8 Нагружают образец со скоростью деформирования (перемещения активного захвата машины) от 0,5 до 2 мм/мин и с записью диаграммы «нагрузка — деформация» (см. рисунок 1). При увеличении трещины на 25 мм испытание прекращают. Диаграмму записывают также и на стадии разгрузки. Скорость разгрузки может быть увеличена до 10 мм/мин. Если диаграмма из-за преднагрузки или ее отсутствия выходит не из начала координат, то она должна быть к нему приведена.

7.9 Если длина образца позволяет, испытание может быть проведено повторно. Для этого повторяют действия с 7.6.

8 Обработка результатов

Удельную работу расслоения G_{II} вычисляют для каждой точки диаграммы нагрузка — деформация двумя методами.

8.1 Метод А. Если длину трещины измеряли непосредственно при испытании, удельную работу расслоения G_{II}, Дж/мм^2, определяют по формуле

$$G_{II} = \frac{3mP^2a^2}{2b}, \quad (4)$$

где m — коэффициент уравнения (3), Н$^{-1}$ · мм$^{-2}$;

a — длина трещины расслоения, определяемая как расстояние от боковой опоры до вершины трещины, мм;

P — усилие, Н;

b — ширина образца, мм.

8.2 Метод В. Если длину трещины не измеряют непосредственно при испытании, удельную работу расслоения G_{II} через податливость образца определяют по формуле

$$G_{II} = \frac{3P^2 \left(C - C_0\right)^{2/3} m^{1/3}}{2b}, \quad (5)$$

где C_0 — коэффициент уравнения (3), мм/Н.

Рекомендуется использовать второй метод расчета.

8.3 Критическое значение удельной работы расслоения G_{IIC} равно величине G_{II} при критической нагрузке P_C, которую определяют тремя способами:

$P_C = P_{нл}$ — нагрузка при отклонении диаграммы от линейной;

$P_C = P_{виз}$ — нагрузка в момент страгивания трещины (момент страгивания определяется визуально или методами неразрушающего контроля);

$P_C = P_{5\,\%}$ — нагрузка в точке пересечения прямой, выходящей из начала координат, тангенс угла которой на 5 % меньше тангенса угла линейного участка диаграммы нагрузка — перемещение, осью абсцисс или максимальная нагрузка на диаграмме, если она левее точки пересечения (см. рисунок 1). Нагрузку, выбранную в качестве P_C, заносят в протокол испытания. Результаты округляют до трех значащих знаков после запятой.

9 Протокол испытаний

9.1 Протокол испытаний должен содержать:

- наименование материала;
- наименование предприятия-изготовителя;
- метод изготовления;
- количество образцов, их маркировку и геометрические размеры;
- способ кондиционирования и условия испытания;
- тип средств измерений и испытаний, заводской номер;
- способ измерений прогиба и нагрузки (класс точности экстензометра, датчика силы);
- скорость испытания;
- значения определяемых показателей для каждого образца;
- дату проведения испытаний;
- ссылку на настоящий стандарт;
- фамилию, имя, отчество и должность оператора, проводящего испытания.

Рекомендуется заносить в протокол объемы пористости и волокна, которые определяют в соответствии с нормативными документами или технической документацией.

9.2 Дополнительно протокол может содержать диаграммы деформирования и фотографии образцов.

Приложение ДА
(справочное)

Положения примененного стандарта ASTM, которые приняты в настоящем стандарте с модификацией их содержания

ДА.1 1 Область применения

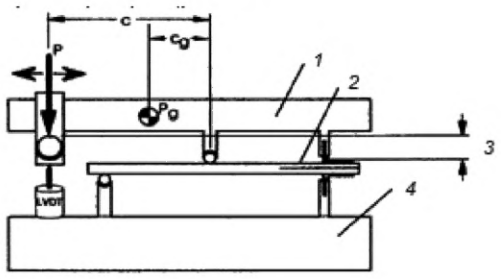
1.1 Настоящий метод испытаний описывает определение межслоевой вязкости разрушения G_c сплошных, армированных волокном композитных материалов при различных соотношениях нагрузки по модам I и II при испытании на изгиб по смешанной моде I + II (ИСМ) нагружения.

1.2 Настоящий метод применим только для композитов, состоящих из однонаправленных слоистых материалов с лентой из углеродных волокон с хрупкими и вязкими однофазными полимерными матрицами. Данный метод испытаний ограничен для определения вязкости разрушения, поскольку он основан на распространении трещины от начальной трещины расслоения. Это ограниченное применение отражает опыт, полученный при межлабораторных испытаниях. Этот метод может оказаться полезным для других типов величин вязкости и для других классов композитных материалов; однако определенные препятствия были замечены. Этот метод испытаний был успешно использован для испытаний вязкости стекловолоконных композитов и клеевых соединений.

Примечание — Технические отклонения в области применения настоящего стандарта связаны с различиями в схемах нагружения для определения межслоевой вязкости разрушения по смешанной моде I + II (отрыв + продольный сдвиг) с варьированием соотношения мод и определения удельной работы расслоения (G_{IIC}) в условиях чистого продольного сдвига (моды II). Возможность внесения данных технических отклонений в части определения удельной работы расслоения (G_{IIC}) в условиях чистого продольного сдвига (моды II) подтверждается пунктами 1.2 и 6.3 ASTM D6671/D6671M—13.

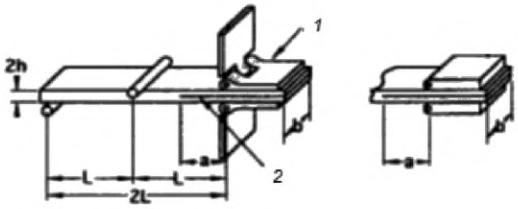
ДА.2 4 Краткое описание метода

Испытательную машину для изгиба по смешанной моде нагружения (ИСМ), показанную на рисунке 1, используют для нагрузки слоистых образцов с целью определения вязкости разрушения при расслоении при различных отношениях нагрузки по модам I и II. Испытуемый образец композита, показанный на рисунке 2, состоит из прямоугольного одинаковой толщины однонаправленного слоистого материала, содержащего в срединной плоскости неклейкую вкладку, которая служит в качестве инициатора расслоения. Нагрузочные усилия прикладывают к образцу при ИСМ посредством лапок, которые устанавливают возле концов расслаиваемой секции образца и шарниров, которые несут нагрузку в нерасслаиваемой зоне. Основание машины для ИСМ удерживает образец на месте, пока рычаг нагружает образец. Основание крепят к нижней лапке образца, что дает нагрузку на образец возле дальнего конца с помощью шарнира. Рычаг крепят к верхней лапке, что дает нагрузку вниз на половину образца между шарниром основания и лапками. Шарнир рычага действует как шарнирная опора, так что при надавливании на плечо рычага против лапки последний вытягивается. Длина плеча рычага *c* может быть изменена для изменения отношения нагрузки, поднимающей лапку к нагрузке, подаваемой через шарнир, что изменит смешение режимов испытаний. Нагрузка должна прикладываться к рычагу так, чтобы оставаться вертикальной в течение всего процесса нагружения. Для уменьшения влияния геометрической нелинейности в результате вращения рычага он должен быть нагружен так, чтобы высота нагружения была слегка выше оси поворота, где рычаг прикрепляется к испытуемому образцу.



1 — рычаг; *2* — образец испытаний; *3* — погрузочная высота; *4* — основание

Рисунок 1 — Оснастка для испытаний по смешанной моде нагружения I + II



1 — шарнир; *2* — расслаивание

Рисунок 2 — Варианты испытаний на ИСМ

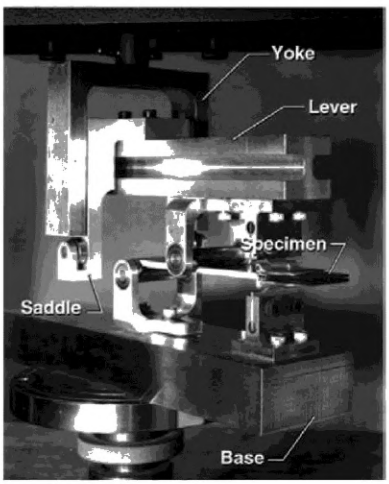
4.2 Запись расхождения сторон трещины в зависимости от приложенной нагрузки производят при помощи двухкоординатного самописца или аналогичного графопостроителя в реальном времени, или она хранится в цифровом виде для последующей обработки. Межслойную вязкость разрушения G_c и долю G_{II}/G рассчитывают по критическим нагрузкам, взятым из кривой смещения нагрузок.

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

ДА.3 7 Аппаратура

7.1 Оснастка для испытаний по смешанной моде нагружения I + II, как показано на рисунке 5, использует рычаг для нагружения образца ИСМ. При приложении одной нагрузки на конец рычага давление вниз прикладывается к центру образца, создавая моду II; в то же время давление вверх прикладывается к стороне образца слоистого материала с начальной трещиной, создавая моду I. Чертежи машины, в качестве примера, для испытания на ИСМ можно найти в приложении X 2, но возможны другие конструкции, которые выполняют необходимые функции. Половина длины пролета машины на ИСМ L должна быть 50 мм (2 дюйма). Для обеспечения малого влияния нелинейной геометрии высота нагружения (высота точки нагружения над точкой шарнира, крепящего рычаг к испытуемому образцу, как показано на рисунке 1) должна быть 0,3 L, а прикладываемая нагрузка должна оставаться вертикальной, пока машина нагружена. Приложение нагрузки к рычагу и образцу должно обеспечивать сдвиг с минимальным трением. В изображенной машине это происходит с помощью роликовых подшипников, но возможны эквивалентные средства.

7.2 Испытательная машина. Должна быть использована правильно настроенная испытательная машина, которая может работать в режиме управления смещением при постоянной скорости смещения в диапазоне от 0,5 до 5,0 мм/мин (от 0,02 до 0,20 дюймов в минуту). Испытательная машина должна соответствовать требованиям руководства E4. Испытательная машина должна быть оборудована скобой, которая должна быть прикреплена к станине машины на ИСМ, а также опорным столом, на котором должно быть установлено основание машины на ИСМ.



Saddle	Суппорт
Yoke	Узел нагрузки
Lever	Рычаг
Specimen	Образец
Base	Основание

Рисунок 5 — Оснастка для испытаний по смешанной моде

7.3 Индикатор нагрузки. Чувствительный элемент испытательной машины должен быть способен определять полную нагрузку, которой подвергается испытуемый образец. Это устройство должно быть особенно безинерционным при назначенных параметрах испытаний и показывать нагрузку с погрешностью в пределах ± 1 % определяемой величины во всех интересующих диапазонах.

7.4 Индикатор смещения точки приложения нагрузки. Смещение точки приложения нагрузки может быть взято по положениям ползуна нагружающей рамы или по показаниям внешнего прибора, прикрепленного к машине на ИСМ. Если для измерения смещения точки нагрузки используют положение ползуна, то для соответствия нагрузочной системы C_{sys} должна быть выполнена коррекция, которая включает согласование нагрузочной рамы и машины на ИСМ. Соответствие нагрузочной системы должно быть измерено на каждой длине рычага c во время испытаний (см. 11.5). Нагрузочная система C_{sys} необходима в уравнении модуля упругости образца для коррекции соответствия нагрузочной системы.

7.4.1 Смещение точки приложения нагрузки может быть получено с помощью соответственно калиброванного внешнего прибора, прикрепленного к машине на ИСМ, такого как датчик линейно меняющихся смещений (LVDT), как показано на рисунке 1. Индикатор смещений показывает смещение точки нагрузки с погрешностью в пределах ± 1 % определяемого значения после того, как произойдет расслоение. Если смещение точки нагрузки определяют по внешнему прибору или датчику, значение C_{sys} должно быть установлено на нуль в уравнении модуля упругости образца (уравнение 10).

7.5 Регистрация зависимости нагрузки от смещения точки нагрузки. Для выполнения постоянной регистрации зависимости нагрузки от смещения раскрытия в точке приложения нагрузки во время испытаний должен быть применен двухкоординатный графопостроитель или аналогичный прибор. Альтернативно данные могут быть накоплены в цифровом виде и затем обработаны.

7.6 Оптический микроскоп (только для этапа развития). Для наблюдения фронта расслоения и его расширения на одном конце во время испытаний должен быть установлен переносной оптический микроскоп с увеличением не более 70^{x} или эквивалентный увеличительный прибор. Этот прибор должен быть способен точно определять фронт расслоения с погрешностью не более ± 0,5 мм (± 0,02 дюйма). Для визуального определения любого нарушения в начале расслоения от одной стороны образца до другой должно быть использовано зеркало. Для наблюдения длины расслоения могут быть использованы другие методы, такие как измерители длины трещин, устанавливаемые на конце образца, при условии, что погрешность так же мала, как и у оптического микроскопа, а длина расслоения может быть измерена с погрешностью, указанной выше.

7.7 Для неровных поверхностей, таких как оболочка слоистого материала и плоский переход на обработанных краях или очень гладкие обработанные поверхности в микрометрах, должны быть использованы шариковые устройства соответствующего диаметра. Погрешность измерительных приборов должна обеспечивать показания в пределах 1 % ширины и толщины образца. Для измерения ширины и толщины образца с обычными геометрическими параметрами желательно использовать приборы с погрешностью ± 0,25 мм (0,001 дюйм).

7.8 Точность всего измерительного оборудования должна иметь утвержденные калибровки, которые проводятся во время его эксплуатации.

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

ДА.4 8 Отбор образцов и испытуемые образцы

8.1 Образцы слоистого материала содержат четное число слоев и должны быть однонаправленными, с трещиной расслоения в направление 0°.

8.2 Для создания места инициирования расслоения во время укладки в срединную плоскость должна быть введена неклейкая вставка. Толщина пленки должна быть не более 13 мкм (0,0005 дюйма). Образцы не должны иметь предварительных трещин для возможности измерения величины страгивания трещины (см. 5.3.2). Во избежание проблем со складыванием или гофрированием на обрезанном конце вставки, как наблюдалось на вставках из алюминиевой фольги во время межлабораторных испытаний образцов, рекомендуется использовать полимерную пленку [см. Метод испытаний D5528 (6)].

8.3 Размеры образца

8.3.1 Полная длина образца — приблизительно 137 мм (5,5 дюйма). Ширина образца должна быть от 20 до 25 мм (от 0,8 до 1,0 дюйма) включительно.

Примечание — Межлабораторные испытания узких и широких ДКБ образцов по методу испытаний D5528 дали одинаковые результаты. Так как образец для испытания на ИСМ аналогичен, его ширину не рассматривают как критичную.

8.3.2 Длина вставки — приблизительно 50 мм (2 дюйма), что соответствует первоначальной длине расслоения приблизительно 25 мм (1 дюйм) плюс дополнительная длина для применения лапок. Конец вставки должен быть точно установлен и помечен на панели перед вырезкой образцов.

8.4 Толщина слоистого материала обычно должна быть от 3 до 5 мм (0,12 и 0,2 дюйма). Колебания толщины для любого данного образца не должны превышать 0,1 мм (0,004 дюйма). Во избежание больших прикладываемых

перемещений и ошибок из-за геометрии может быть необходимо увеличение толщины образца, как описано в 13.2. Толщину образца определяют с помощью формул (2) и (3):

$$\delta^{est} = \frac{P^{est}}{8bE_{11}h^3L^2}\left[4(3c-L)^2(a+hx)^3 + (c+L)^2\left(2L^3 + 3(a+0,42hx)^3\right)\right], \quad (2)$$

$$P^{est} = \sqrt{\frac{\frac{4}{3}G_c^{est}b^2E_{11}h^3L^2}{(3c-L)^2(a+hx)^2 + \frac{3}{4}(c+L)^2(a+0,42hx)^2}}, \quad (3)$$

где a — длина расслоения, мм

b — ширина образца, мм;

c — длина рычага испытательной машины на ИСМ, мм;

E_{11} — продольный модуль упругости, измеренный при растяжении, МПа;

E_{22} — поперечный модуль упругости, МПа;

G_{13} — модуль сдвига, МПа;

G_c^{est} — оценочная величина полной вязкости разрушения по смешанной моде нагружения I + II, кДж/м^2;

h — половина толщины испытуемого образца, мм;

L — половина длины пролета испытательной машины при ИСМ, мм;

P^{est} — оценочная величина критической нагрузки, Н;

χ — поправка на длину трещины;

$$\chi = \sqrt{\frac{E_{11}}{11G_{13}}\left\{3 - 2\left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma}\right)^2\right\}},$$

δ^{est} — оценочное смещение нагрузочной точки, мм;

Γ — поправка поперечного модуля

$$\Gamma = 1,18\frac{\sqrt{E_{11}E_{22}}}{G_{13}}.$$

8.7.1 Приклеенные лапки. Склеиваемые поверхности лапок и образца должны быть тщательно очищены перед склеиванием, чтобы обеспечить передачу нагрузки без отклеивания лапок от образца во время испытаний. Если начинается расслоение или же при повторной нагрузке увеличивается податливость, то образец больше не используют.

8.7.1.1 Подготовка поверхности образца. Для удаления любых загрязнений допускается пескоструйная обработка или обработка наждачной бумагой склеиваемой поверхности образца, затем поверхность образца протирают начисто летучим растворителем, таким как ацетон или метилэтилкетон (МЭК).

8.7.1.2 Подготовка поверхности нагрузочной лапки. Нагрузочные лапки могут быть очищены, как указано в 8.7.1.1. Если после этой процедуры возникнет отклеивание между образцом и лапками, необходим более сложный метод очистки, основанный на обезжиривании и химическом травлении. Обратитесь к руководству D2651, где имеется процедура подготовки поверхности, которая наиболее подходит для металла, из которого изготовлены лапки.

8.7.1.3 Склеивание. Приклеивание лапок к образцу выполняют сразу после подготовки поверхностей. Рекомендуют использовать клеи, отверждающиеся при комнатной температуре. В некоторых случаях удовлетворительным является цианоакрилат («суперклей»). Клей может стать лучше за счет последующего отверждения, если провести сушку образца после установки лапок. Если нужно, к клею могут быть добавлены стеклянные шарики, чтобы контролировать толщину клеевого слоя; могут быть также использованы другие формы контроля. Нагрузочные лапки должны быть выставлены параллельно образцу и друг другу и удерживаться на месте хомутами, пока сохнет клей.

8.7.2 Лапки, прикрепленные механически. Лапки должны быть прикреплены так, чтобы нагрузка передалась равномерно по ширине образца в зоне действия измерительных приборов. Образец не должен быть закреплен таким образом, который не приведет к изгибу по ширине.

Примечание — Данный пункт примененного международного стандарта изменен в настоящем стандарте в целях соблюдения норм русского языка и в соответствии с требованиями ГОСТ 1.5—2001 (пункты 4.4.3, 7.9.7).

ДА.5 10 Кондиционирование

10.1 Стандартная процедура подготовки. Подготовку осуществляют согласно процедуре С метода испытаний D5229/D5229M. Хранят и испытывают образцы при стандартных лабораторных условиях (23 ± 3) °С (73 ± 5) °F и относительной влажности (50 ±10) %.

10.2 Сушка. Если необходимы данные межслоевой вязкости разрушения для слоистых материалов в сухом состоянии, выполняют процедуру D метода испытаний D5229/D5229M.

Примечание — Термин «влага», как он применяется в методе испытаний D5229/D5229M, подразумевает не только пар жидкости и ее конденсат, но и саму жидкость в больших количествах, так же, как и в случае погружения.

Примечание — Редакция раздела изменена для приведения в соответствие с требованиями ГОСТ 1.5—2001 (пункт 7.9.7).

ДА.6 11 Процедура

11.1 Измеряют ширину и толщину каждого образца вблизи средней точки 0,025 мм (0,001 дюйма) и на 25 мм (1 дюйм) от любого конца. Вариация толщины по длине образца не превышает 0,1 мм (0,004 дюйма). Записывают средние значения ширины и толщины.

11.2 Только для этапа распространения. Отмечают вершину начальной трещины расслоения. Недопустимо фиксировать вершину трещины путем раскрытия образца. Если трудно поместить конец вставки со стороны первоначальной отметки на панели, то следует потереть край образца по месту расположения вставки мягким свинцовым карандашом, затем отполировать край образца.

11.3 Только для этапа распространения. Оба края образца непосредственно перед вставкой покрывают тонким слоем водорастворимой корректурной жидкости для пишущих машинок или аналогом для облегчения наблюдения начала расслоения. Конец вставки отмечают тонкой вертикальной чертой. Также отмечают каждый 1 мм (1/16 дюйма) для первых 5 мм (1/4 дюйма) после конца вставки и каждые 5 мм (1/4 дюйма) после этого до 25 мм (1 дюйм).

11.5 Проверяют нагрузочную систему на податливость C_{sys}, если для перемещения точки нагрузки используют перемещение ползуна, а соответствие нагрузочной системы не было проверено ранее на установку оперативной длины рычага.

11.5.1 При испытании калибровочный образец устанавливают на ИСМ вместо используемого. Калибровочный образец должен быть выполнен в виде прямоугольного стержня, сделанного из однородного материала с известной величиной модуля. Калибровочный образец должен иметь лапки, прикладываемые к одному концу, аналогично образцу на ИСМ, и должен иметь жесткость не менее, чем стальной стержень с I = 450 мм^4 (0,001 дюйма в четвертой степени). Рассчитывают податливость калибровочного образца по следующей формуле

$$C_{cal} = \frac{2L(c+L)^2}{E_{cal} b_{cal} t^3}, \quad (8)$$

где b_{cal} — ширина калибровочного образца, мм;

C_{cal} — податливость калибровочного образца δ/P, мм/Н;

E_{cal} — модуль калибровочного стержня (известная величина), МПа;

t — толщина калибровочного образца, мм.

11.5.2 Для испытания калибровочный стержень устанавливают на ИСМ и записывают характеристику нагрузки — перемещение. Нагружают калибровочный стержень приблизительно на 75 % оценочной нагрузки, которую дает формула (3) для испытаний на расслоение, которые следует выполнить. Все данные к формуле (3) должны быть взяты для испытуемого образца, а не для калибровочного. Длина расслоения должна быть начальной длиной расслоения (α_o).

11.5.3 Определяют наклон нагрузочной кривой m_{cal}. Рассчитывают податливость испытательной системы при ИСМ с помощью следующей формулы

$$C_{sys} = \frac{1}{m_{cal}} - C_{cal}, \quad (9)$$

где m_{cal} — наклон калибровочной кривой P/δ, мм/Н;

C_{sys} — податливость системы δ/P, мм/Н.

Податливость нагрузочной системы при ИСМ определяют при каждой установке длины рычага, которая должна быть использована.

11.7 (Только для этапа распространения). Для наблюдения роста расслоения устанавливают оптический микроскоп (см. 7.6) или аналогичный увеличительный прибор. Этот прибор должен быть способен четко показывать фронт расслоения с погрешностью в пределах ± 0,5 мм (± 0,02 дюйма).

11.8 При управлении перемещением образец нагружают непрерывно. Прикладывают нагрузку к образцу посредством ползуна (или ползуна с гидравлическим приводом), перемещаемого со скоростью 0,5 мм/мин (0,02 дюйма/мин), и записывают кривую зависимости нагрузки от перемещения, как показано на рисунке 4. Это может быть выполнено с помощью двухкоординатного самописца или электронных устройств.

11.13 Проверяют линии на расщепленной поверхности, которые показывают текущее увеличение фронта расслоения. Если они имеются на поверхности образца, отметки должны показать, что расслоение росло равномерно

от вставки и не превалировало на той или другой стороне. Если расстояние от линии роста до вставки расслоения на двух краях образца отличается более чем на 2 мм (1/16 дюйма), то испытания должны быть прекращены из-за неравномерного роста.

11.15 Берут кривую перемещения нагрузки и отмечают наклон начальной части кривой, при этом пренебрегая всякой начальной нелинейностью, которая может быть на первых 20 % нагрузочной кривой. Определяют наклон этой отмеченной линии и записывают его как *m*. Находят точку на кривой нагрузки и перемещения, где кривая нагрузки и отмеченная линия наклона расходятся, и отмечают эту точку как точку нелинейности *NL*. Отмечают вторую линию, которая пересекает первую отмеченную линию при нулевой нагрузке и имеет наклон, уменьшенный на 5 %. Находят место, где вторая отмеченная линия пересекает нагрузочную кривую. Если пересечение происходит перед точкой максимума, отмечают пересечение точки максимальной нагрузки как 5 % Max.

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

ДА.7 13 Обработка результатов

13.1 Определяют модуль упругости волокна при изгибе E_{1f}. Жесткость слоистого материала используют при следующем расчете вязкости разрушения

$$E_{1f} = \frac{8\left(a_o + xh\right)^3 (3c + L)^3 \left[6\left(a_o + 0,42xh\right)^3 + 4L^3\right](3c + L)^2}{16L^2bh^3\left(\frac{1}{m} - C_{sys}\right)}, \quad (10)$$

где E_{1f} — модуль упругости волокна, измеренный при изгибе, МПа;

a_o — начальная длина расслаивания, мм;

m — наклон кривой нагрузки — перемещение, Н/мм.

Так как расчетные E_{1f} и G_c слабо зависят от E_{11}, E_{22} и G_{13}, используют известные данные по материалу или классу материалов. Предыдущее уравнение предусматривает поперечный модуль сдвига G_{13}, который, предположительно, равен модулю плоского сдвига G_{12} для однонаправленных композитов.

13.2 Проверка нелинейной погрешности. Последующие расчеты вязкости разрушения предполагают линейно-упругое поведение испытуемого образца. Если действующее перемещение становится слишком большим, это предположение будет нарушено, а из-за нелинейности геометрии могут возникнуть значительные погрешности. Нелинейные геометрические погрешности будут менее 5 %, если действующее перемещение будет менее δ^{max} (2).

$$\delta^{max} = L\left(0,27 - 0,06\frac{G_{II}}{G}\right), \quad (11)$$

где δ^{max} — максимально допустимое действующее перемещение, мм.

Действующая нагрузка остается ниже δ^{max}, за исключением тех случаев, когда испытывают очень жесткие материалы или чрезвычайно тонкий образец. Приемлемая величина вязкости разрушения не может быть рассчитана, если действующее перемещение становится больше δ^{max}. Если действующее перемещение больше δ^{max}, образец должен быть преобразован с помощью уравнений, приведенных в 8.4. Действующее перемещение увеличивается с длиной расслоения, поэтому образец должен быть увеличен так, чтобы длина расслоения могла достичь наибольшего значения, где вязкость должна быть рассчитана без δ^{est}, становящейся больше, чем δ^{max}.

13.3 Вязкость разрушения G_c и коэффициент нагружения по смешанной моде G_I/G_{II} могут быть рассчитаны с помощью следующих уравнений. Эти уравнения основаны на коррекции длины расслоения (10—12) для ротации слоистых материалов по фронту расслоения, что согласуется с результатами метода конечных элементов (13).

$$G_I = \frac{12P^2(c - L)^2}{16b^2h^3L^2E_{1f}}(a + xh)^2; \quad (12)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2(c - L)^2}{16b^2h^3L^2E_{1f}}(a + 0,42xh)^2; \quad (13)$$

$$G = G_I + G_{II}; \quad (14)$$

$$\frac{G_{II}}{G} = \frac{G_{II}}{G_I + G_{II}}, \quad (15)$$

где G_I — компонент скорости выделения энергии деформации по моде I, кДж/м^2;

G_{II} — компонент скорости выделения энергии деформации по моде II, кДж/м^2;

G — полная скорость выделения энергии деформации по смешанной моде нагружения, кДж/м^2.

Скорость выделения энергии деформации и доля моды II могут быть выполнены для любых условий нагрузки, когда в формулах [12]—[15] используют критические условия нагрузки, связанные с ростом расслоения, скорость выделения энергии деформации равна вязкости разрушения.

$$G_C = G\Big|_{P_c, a_o} \text{ или } G\Big|_{P_{1-25}, a_{1-25}}, \tag{16}$$

где P_c — любое из P_{nl}, $P_{5\ \%max}$, или P_{VIS}, Н;

a — начальная длина расслоения, мм;

$a_{1—25}$ — длина распространения расслоения, мм.

Первоначальная длина расслоения a_o должна быть измерена от торца, тогда как длины распространения расслоения $a_{1—25}$ измеряют по отметке на краю образца, которые были связаны с нагрузками и перемещениями, сделанными во время распространения расслоения.

13.3.1 Коррекция веса рычага. Рычаг и нагружающее устройство должны быть сделаны из легкого материала, такого как алюминий. Иногда, когда испытывается материал с низкой вязкостью, вес рычага может вызвать значительную нагрузку образца, влияя на измеренную вязкость. Это должно быть учтено, когда вес рычага и связанного с ним нагрузочного аппарата (P_g) превышает 3 % действующей нагрузки (P). Для точного учета веса рычага могут быть использованы следующие уравнения, где c_g — расстояние от центра тяжести до центра шарнира, как показано на рисунке 1 (c_g будет меняться в зависимости от положения нагрузки рычага). Если какое-либо испытание из серии испытаний материала требует коррекции для веса рычага, коррекция должна быть выполнена для всех испытаний:

$$G_{\text{I}} = \frac{12\left[P(3c - L) + P_g\left(3c_g - L\right)\right]^2}{16b^2h^3L^2E_{1f}}(a + xh)^2; \tag{17}$$

$$G_{\text{II}} = \frac{9\left[P(c + L) + P_g\left(c_g + L\right)\right]^2}{16b^2h^3L^2E_{1f}}(a + 0{,}42xh)^2. \tag{18}$$

Внесение коррекции для веса рычага вызовет отличие длины рычага при нагружении по смешанной моде, определенной по уравнению (5). Если можно оценить критическую действующую нагрузку, длину рычага определяют по формуле

$$c = \left(1 + \frac{P_g}{P^{\text{est}}}\right)\frac{12\beta^2 + 3\alpha + 9\sqrt{3\alpha}}{\left(36\beta^2 - 3\alpha\right)}L - \frac{P_g}{P^{\text{est}}}c_g. \tag{19}$$

Примечание — Редакция раздела изменена для приведения в соответствие с требованиями ГОСТ 1.5—2001 (пункт 7.9.9).

ДА.8 11.16 Интерпретация результатов испытаний. Из графика нагрузка — перемещение могут быть определены несколько значений G_c.

11.16.1 Отклонение от линейности (*NL*). Расчет G_c с помощью отмеченной точки *NL* предполагает, что расслоение начинает расти от вставки внутри образца в данной точке (9). Величина *NL* представляет собой минимальное связанное значение G_c. Для композитов с хрупкой матрицей это обычно точка, при которой наблюдают рост расслоения от вставки на краю образца. Для композитов с жесткой матрицей область нелинейного поведения может предшествовать визуальному определению начала расслоения на краях образца, даже если кривая разгрузки будет линейной.

11.16.2 5%-ное отклонение от максимальной нагрузки (5 % Max). Расчет G_c с помощью отмеченной точки 5 % Max обычно дает наиболее годные значения, но в связи с тем, что они также обычно максимальные, они могут быть неконсервативными.

11.16.3 Визуальное наблюдение (*VIS*) (только для этапа распространения). Расчет G_c с помощью отмеченной точки *VIS* дает вязкость разрушения для первой точки, в которой визуально наблюдают рост расслоения от вставки на любом конце при помощи микроскопа, как описано в 7.6; обычно это промежуточное значение между *NL* и 5 % Max.

11.16.4 Распространение (только для этапа распространения). Значения G_c, рассчитанные по нагрузке и перемещению, и длина трещин, измеренная во время увеличения расслоения, часто бывают искусственно завышенными в результате сшивки волокон (см. 5.3.2), но спад распространения может быть показателем плохой вставки расслоения. В зоне высокоактивной моды II некоторые материалы показывают значения распространения ниже, чем показатели вставки, даже для тонких вставок. Поскольку не ожидается, что сшивка будет активной в увеличении вязкости разрушения при высокоактивной моде II, величины вязкости распространения могут иногда быть более консервативными для данного типа нагрузки.

Примечание — Редакция раздела изменена для приведения в соответствие с требованиями ГОСТ 1.5—2001.

ДА.9 14 Протокол испытаний

14.1 Технические данные. Протокол испытаний должен содержать следующую информацию (сведения о вопросах, не входящих в полномочия данной испытательной лаборатории, таких, которые могут произойти с деталями материалов или параметрами изготовления материалов, остаются под ответственностью заказчика).

14.1.1 Материал. Выполняют идентификацию испытуемого материала, включая изготовителя препрега, обозначение материала, процесс изготовления, объемную долю волокон и долю пустот. Используют метод для определения доли объема волокон и доли пустот. Также включают значение модуля поперечного сдвига и модуля упругости при сдвиге.

14.1.2 Данные образца для испытаний. Средняя номинальная толщина и ширина каждого образца и максимальное отклонение толщины от длины балки, тип и толщина вставки.

14.1.3 Установка для испытаний. Тип нагружающей системы. Податливость нагружающей системы C_{sys}, длина плеча рычага c и половина длины пролета.

14.1.4 Процедура испытаний. Процедура сушки, относительная влажность, температура испытаний и диапазон нагрузок.

14.2 Результаты испытаний:

14.2.1 Кривая нагрузка — перемещение, показывающая нагрузку, перемещение и критические точки: первое отклонение от линейности (*NL*), 5 % смещения (5 %) и максимальная нагрузка (max). [Кривые, построенные на этапе распространения, должны также показывать визуальную точку начала (*VIS*), а также точки, в которых наблюдался рост расслоения после каждой отметки на краю образца (1—25).] Если нагрузка не возвращается в нуль, в плече балки может возникнуть повреждение. Отмечают это в протоколе испытаний.

14.2.2 Измеренные результаты, в том числе наклон m, нагрузку, связанную с каждой критической точкой, и длину расслоения.

14.2.3 Расчетные результаты, в том числе коэффициенты коррекции Г и X, модуль изгиба E_{1f}, момент инерции площади I и величину вязкости G_c и G_{II}/G для каждой критической точки.

14.3 Сведения об испытаниях заносят в протокол испытаний, включая количество испытуемых образцов, и средние значения, стандартные отклонения и коэффициент вариации (стандартная девиация, деленная на среднее значение) значений G_c и G_{II}/G.

14.4 Если испытание осуществлялось по разным модам, то результаты должны быть представлены, как показано на рисунке 3, где изображен график зависимости G_c от доли G_{II}/G.

Примечание — Редакция раздела изменена для приведения в соответствие с требованиями ГОСТ 1.5—2001 (пункт 7.9.10).

Приложение ДБ
(справочное)

Положения примененного стандарта ASTM, не включенные в основную часть настоящего стандарта

ДБ.1 1 Область применения

1.3 В качестве стандартных должны быть представлены значения, выраженные либо в системе СИ, либо в системе фунты — дюймы. Значения, представленные в каждой системе, могут не быть точными эквивалентами, поэтому каждая система должна быть использована независимо одна от другой. Комбинирование значений из двух систем может привести к несоответствию стандарту.

1.4 Данный стандарт не предполагает освещения всех положений безопасности, если они имеются, которые сопряжены с его использованием. Организация мероприятий по обеспечению надлежащей безопасности и гигиены труда и определение применимости нормативных ограничений перед использованием данного стандарта является ответственностью пользователя данного стандарта.

Примечание — Подразделы исключены из настоящего стандарта, поскольку носят справочный характер.

ДБ.2 3 Терминология

3.1 Терминология D3878 определяет термины, связанные с высокомодульными волокнами и их композитами. Терминология D883 определяет термины, связанные с пластмассами. Терминология E6 определяет термины, связанные с механическими испытаниями. Терминология E456 и руководства E177 определяют термины, связанные со статистикой. В случае расхождения между терминами терминология D3878 имеет преимущество над другими терминологическими стандартами.

3.3 Условные обозначения:

a — длина расслоения, мм;
a_o — начальная длина расслоения, мм;
$a_{1—25}$ — протяженность длин расслоения, мм;
b — ширина образца, мм;
b_{cal} — ширина калибровочного образца, мм;
c — длина рычага испытательной машины при ИСМ, мм;
c_g — длина рычага до центра тяжести, мм;
C — податливость, δ/P, мм/Н;
C_{cal} — податливость калибровочного образца, мм/Н;
C_{sys} — податливость системы, δ/P, мм/Н;
CV — коэффициент вариации, %;
E_{11} — продольный модуль упругости, измеренный при растяжении, МПа;
E_{22} — модуль поперечной упругости, МПа;
E_{cal} — модуль калибровочного стержня, МПа;
E_{1f} — модуль упругости в направлении волокон, измеренный при изгибе, МПа;
G — полная скорость выделения энергии деформации, кДж/м^2;
G_{13} — модуль сдвига при поперечном изгибе, МПа;
G_{12} — модуль плоского сдвига, МПа;
G_I — компонент скорости выделения энергии деформации по моде I, кДж/м^2;
G_{II} — компонент скорости выделения энергии деформации моде II, кДж/м^2;
G_{II}/G — доля моды II в полной скорости выделения энергии деформации;
G_c — полная вязкость разрушения по смешанной моде I + II, кДж/м^2;
G_c^{est} — оценочная величина полной вязкости разрушения по смешанной моде, кДж/м^2;
h — половина толщины испытуемого образца, мм;
L — половина длины пролета при ИСМ нагружения;
m — наклон кривой перемещения нагрузки, Н/мм;
m_{cal} — наклон кривой перемещения нагрузки при калибровочных испытаниях, Н/мм;
P — приложенная нагрузка;
$P_{5\ \%/max}$ — критическая нагрузка в точке 5 % max нагрузочной кривой, Н;
P_{est} — оценочная величина критической нагрузки, Н [фунт — сила];
P_g — вес рычага и узла крепления, Н [фунт — сила];
P_{nl} — критическая нагрузка в нелинейной точке нагрузочной кривой, Н;
P_{tab} — ожидаемая нагрузка на нагрузочную лапку, Н [фунт — сила];
P_{vis} — критическая нагрузка, когда наблюдается рост расслоения, Н;
SD — стандартная девиация;

t — толщина калибровочного стержня, мм;
U — энергия деформации, Н · мм;
V — доля объема волокон, %;
α — параметр трансформации по смешанной моде для установки длины рычага;
β — безразмерная поправка на длину трещины по смешанной моде;
χ — параметр коррекции на длину трещины;

$$\chi = \sqrt{\frac{E_{11}}{11G_{13}}\left\{3 - 2\left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma}\right)^2\right\}};$$

δ — смещение нагрузочной точки, мм;
δ^{est} — оценочное смещение нагрузочной точки, мм;
δ^{max} — максимально допустимое смещение нагрузочной точки, мм;
Γ — параметр коррекции поперечного модуля;

$$\Gamma = 1{,}18\frac{\sqrt{E_{11}E_{22}}}{G_{13}}.$$

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

ДБ.3 5 Значение и применение

5.1 Подверженность расслоению является одной из главных проблем многих слоистых композитных структур. Знание стойкости композита к межслойному разрушению необходимо для создания продукта и выбора материала. Так как расслоения могут возникать и увеличиваться при нагрузках в широком диапазоне нагружения по смешанной моде, важно, чтобы вязкость композита была измерена по каждой моде нагружения. Контур вязкости, где вязкость разрушения изображена как функция смешанной моды, полезен для оценки критерия разрушения, используемого в анализе допустимых повреждений для композитных структур, сделанных из этих материалов.

5.2 Настоящий метод испытаний может служить для следующих целей:

5.2.1 Для количественной оценки влияния поверхностной обработки волокон, местных вариаций в объемной доле волокон, а также параметров процесса и окружающей среды на G_c отдельного материала композита по смешанной моде.

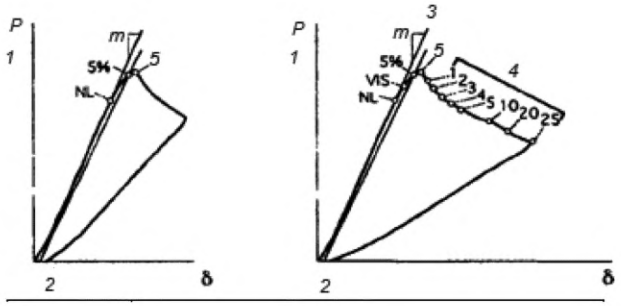
5.2.2 Для количественного сравнения связанных значений G_c в зависимости от смешанной моды для композитных материалов с различными составляющими.

5.2.3 Для разработки критериев разрушения при расслоении для допусков повреждения композитов и анализа долговечности.

5.3 Настоящий метод может быть использован для определения следующих величин вязкости расслоения:

5.3.1 Инициирование расслоения. Должны быть представлены две величины инициирования расслоения: 1 — в точке отклонения от линейности на кривой нагрузки смещения (NL) и 2 — в точке, где податливость увеличивается на 5 % или же нагрузка достигает максимального значения (5 % max) на кривой зависимости прогиба от нагрузки (см. рисунок 4). Каждое определение инициирования расслоения связано с его собственным значением G_c и G_{II}/G, рассчитанным по нагрузке в соответствующей критической точке. Значение 5 % max G_c обычно наиболее воспроизводимо из трех значений G_c. При записи данных на этапе развития трещины (см. 5.3.2) третье значение инициирования может быть представлено в точке начального расслоения на краю образца. Эта точка (VIS) часто располагается между NL и точкой 5 % Max.

5.3.2 Этап распространения. При испытаниях на ИСМ расслоение будет увеличиваться стабильно или нет, в зависимости от моды испытания. В качестве опции могут быть собраны значения вязкости распространения, когда расслоения растут стабильно. Значения вязкости распространения невозможно получить, если расслоение растет нестабильно. Вязкость распространения может сильно зависеть от волоконной сшивки, которая является артефактом испытуемого образца с нулевой отметкой. Так как они часто оказываются искусственными, значения распространения должны быть четко обозначены, когда они были представлены как таковые. Одним из аспектов использования значений распространения является проверка проблем, связанных с вставкой для расслоения. Обычно значения вязкости расслоения получаются из значений инициирования, когда расслоение развивается, и сшивка волокон имеет место. Если значения вязкости уменьшаются, когда расслоение растет, причиной этого часто бывает плохая вставка. Расслоение может быть слишком толстым или деформированным таким образом, что на конце вставки образуется смоляной карман. Для получения точных значений инициирования критичным является тщательное введение и контроль вставки для расслоения.



1	Нагрузка
2	Расположение точки нагрузки
3	Этап распространения
4	Распространение
5	Макс

Рисунок 4 — Кривые нагрузки — перемещения

5.3.3 Вязкость предварительного растрескивания. Иногда вязкость может уменьшаться от значений инициирования, тогда как расслоение развивается (см. 5.3.2). В данном случае необходимо проверить расслоение, чтобы убедиться, что оно соответствует рекомендациям по вставке, указанным в 8.2. Убедившись в том, что уменьшение вязкости не вызвано некачественной вставкой, в качестве опции необходимо рассмотреть предварительное растрескивание. Что касается предварительного растрескивания, расслоение вначале развивается от вставки по моде I, II или смешанной моде I + II. Затем для получения значения вязкости образец нагружается заново для нужной моды.

Примечание — Раздел исключен из настоящего стандарта, поскольку носит справочный и поясняющий характер.

ДБ.4 6 Влияющие факторы

6.1 При расчетах G_c, используемых в данном методе испытаний, предполагают линейное упругое поведение. Это предположение действительно, когда зона повреждения или нелинейной деформации на фронте расслоения или то и другое малы относительно минимального размера образца, которым обычно является его толщина для испытаний на ИСМ.

6.2 Применение для других материалов, укладок и структур аналогично описанному в методе испытаний D5528.

6.3 Значение вязкости нелинейного (NL) инициирования обычно является более консервативной величиной, однако некоторые материалы показали более низкие величины вязкости распространения, особенно в высокоактивной моде II. В высокоактивной моде II рост расслоения часто нестабилен, что препятствует определению значений вязкости распространения. Для этих выбранных материалов использование значений вязкости инициирования может привести к предсказанию нестабильного роста. Использование более длинных начальных расслоений увеличивает тенденцию к стабильному росту расслоения.

Примечание — Раздел исключен из настоящего стандарта, поскольку носит справочный и поясняющий характер.

ДБ.5 8 Отбор образцов и испытуемые образцы

8.5 Объемы пустот и волокон должны быть представлены. Объем пустот может быть определен с помощью уравнений метода испытаний D 2734. Объемную долю волокон определяют с помощью процесса дигерирования согласно методу испытаний D 3171.

8.6 Опробирование. Результаты могут быть получены с использованием меньшего числа образцов, испытания проводят не менее чем на пяти образцах согласно разработанной методике. Для получения статистически значимых данных следует руководствоваться методикой, приведенной в руководстве E122.

8.7 Введение нагрузки. Нагрузку прикладывают посредством лапок. Лапки могут быть выполнены в виде шомпольных шарниров, как показано на рисунках 6 и 7, или концевых блоков. Лапки должны быть установлены так, чтобы длина начала расслоения, измеренная от оси нагрузки до конца вставки, была $0{,}45\ L < a < L - 3\ h$. Лапки должны иметь ширину не менее ширины образца (от 20 до 25 мм или от 0,8 до 1,0 дюйма). Лапки должны быть сделаны из металла с модулем упругости свыше 60 000 МПа и выдерживать приложенные нагрузки без повреждений

по ширине. Лапки могут быть приклеены или присоединены механически. Для уменьшения влияния жесткости образца зона передачи нагрузки не должна распространяться более чем на 3 мм (0,1 дюйма) после центра оси нагрузки в направлении конца расслоения. Для уменьшения геометрической нелинейности центр оси нагрузки должен быть в пределах 4 мм (0,15 дюйма) срединной плоскости подпорки образца. Оценка нагрузки, которая должна быть выполнена лапкой при испытаниях на ИСМ, может быть проведена по оценочным значениям модуля упругости E_{11} и вязкости G_c с помощью следующего уравнения

$$P_{tab} = \frac{4c}{a}\sqrt{\frac{b^2h^3E_{11}G_c^{est}}{117c^2 - 54cL + 21L^2}}, \quad (4)$$

где P_{tab} — ожидаемая нагрузка на лапку, Н [фунт — сила].

ДБ.6 11 Процедура

11.4 Устанавливают длину рычага при испытании на ИСМ так, чтобы создать нужную долю G_{II}/G. Нужную длину рычага дает следующее уравнение (8)

$$c = \frac{12\beta^2 + 3\alpha + 8\beta\sqrt{3\alpha}}{36\beta^2 - 3\alpha} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1 - \frac{G_{II}}{G}}{\frac{G_{II}}{G}}, \quad (6)$$

$$\beta = \frac{a + hx}{a + 0,42hx}. \quad (7)$$

11.6 Устанавливают образец на ИСМ. Образец должен быть отцентрирован в машине и выставлен так, чтобы на одной стороне образца оставался зазор не более 0,05 (0,002 дюйма), когда на противоположной стороне образца проводится первый контакт. Это относится к обоим шарнирам, контактирующим с образцом, и к контакту, сделанному для нагрузки рычага.

11.9 (Только для этапа распространения). Визуально проверяют фронт расслоения на конце вставки с любого края. Если расслоение растет с конца вставки, отмечают положение как VIS на графике кривой зависимости нагрузки от перемещения. Делают дополнительные отметки на графике, когда расслоение будет расти после каждой отметки, сделанной на образце, как описано в 11.3.

11.10 Если расслоение развилось настолько, что нагрузка начинает уменьшаться (для этапа распространения, когда расслоение развилось за последнюю отметку или длины трещины $\alpha = L - 3h$), снимают нагрузку с образца и останавливают испытательную машину. Нагрузки и перемещения должны регистрироваться в течение всего испытания, включая цикл разгрузки. Разгрузка должна выполняться как можно быстрей.

11.11 (Только для этапа распространения). Если для фиксирования увеличения расслоения используют альтернативный метод, например с помощью датчика роста трещин, приклеенного к краю образца, следует проводить сбор данных согласно принципам, погрешности и усилению, описанным выше.

11.12 После окончания испытаний снимают образец и расклиняют его. Берут одну половину образца и измеряют от центра точки нагружения в применяемой лапке до вставки. Проводят измерения в трех местах с погрешностью в пределах ± 0,25 мм (0,01 дюйма) и записывают среднее значение как a_0 — начальную длину расслоения. Если вставка расслоения имеет какие-либо разрывы, складки или дефекты формы (то есть вставка не распрямлена и не параллельна там, где инициируется расслоение), то действительное значение вязкости не может быть зарегистрировано.

11.14 (Только для этапа распространения). Измеряют расстояние от центра оси шарнира до каждой из отметок, сделанных на краю образца, чтобы проследить распространение расслоения.

Примечание — Раздел исключен из настоящего стандарта, поскольку носит справочный и поясняющий характер.

ДБ.7 12 Проверка

12.1 Значения вязкости не рассчитывают для каждого образца, который разрушается образом, отличным от предшествующего расслоения; например при наличии какой-то очевидной трещины, хотя такая трещина представляет собой изменение, которое следует изучить. Для любого образца, для которого нельзя рассчитать параметры, необходимо проводить повторные испытания.

Примечание — Раздел исключен из настоящего стандарта, поскольку носит справочный характер.

ДБ.8

13.4 Статистика. Для каждой серии испытаний рассчитывают среднее значение, стандартное отклонение и коэффициент вариации (в процентах) по каждому определяемому параметру:

$$\overline{x} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)}{n}, \tag{20}$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - nx^{-2}\right)}{(n-1)}}, \tag{21}$$

$$CV = \frac{100 \cdot S_{n-1}}{x}, \tag{22}$$

где $\overline{x}$ — выборочное среднее значение;
S_{n-1} — выборочное стандартное отклонение;
CV — выборочный коэффициент вариации, %;
n — количество образцов;
x_i — измеренное или полученное значение параметра.

ДБ.9 15 Погрешность. Систематическая погрешность

15.1 Погрешность. Для этого метода испытаний данных, требуемых для определения погрешности, нет.

15.2 Систематическая погрешность. Для определения межслоевой вязкости разрушения слоистых композитных материалов по смешанной моде другого стандартного метода не существует. Следовательно, определение систематической погрешности, присущей испытаниям на ИСМ, невозможно.

Примечание — Раздел исключен из настоящего стандарта, поскольку носит справочный и поясняющий характер.

Приложение ДВ
(справочное)

Сравнение структуры стандарта ASTM со структурой межгосударственного стандарта

Таблица ДВ.1

Структура стандарта ASTM D6671/D6671M—13			Структура настоящего стандарта		
Раздел	Подраздел	Пункт	Раздел	Подраздел	Пункт
1	1.1—1.2	—	1	—	—
	(1.3—1.4)*				
2	2.1	—	2	—	—
3	3.1*		3	—	—
	3.2	3.2.1—3.2.8		3.1—3.5	—
	3.3*	—		—	—
4	4.1—4.2	—	4	4.1—4.2	—
5*	5.1—5.3	—	—	—	—
6*	6.1—6.3	—	—	—	—
7	7.1	—	5	5.2	—
	7.2	—		5.1, 7.9	—
	7.3	—		5.1	—
	7.4	7.4.1		5.3	—
	7.5	—		5.5	—
	7.6—7.7	—		5.6	—
8	8.1—8.4	—	6	6.1—6.8	—
	(8.5—8.6)*	—			
	8.7*	8.7.1—8.7.2			
9**	9.1	—	—	5.7	—
10**	10.1—10.3	—	7	7.1	—
11	11.1—11.3	—		7.2—7.3	—
	11.4*			—	—
	11.5	11.5.1—11.5.3		7.6	—
	11.6*	—		—	—
	11.7**	—		5.5	—
	11.8	—		7.8	—
	11.9*	—		—	—
	(11.10—11.12)*	—		—	—
	11.13	—		7.2	—
	11.14*	—			—
	(11.15—11.16)**	—		8.2	—
12*	12.1	—	—	—	—

Окончание таблицы ДВ.1

Структура стандарта ASTM D6671/D6671M—13			Структура настоящего стандарта		
Раздел	Подраздел	Пункт	Раздел	Подраздел	Пункт
13	13.1—13.2	—	8	8.1—8.3	—
	13.3	13.3.1			
	13.4*	—		—	—
14	14.1—14.4	—	9	9.1—9.2	—
15*	15.1—15.2	—	—	—	—
16**	16.1	—	—	—	—
Приложение		X1*	Приложение		—
		X2*			—
		X3*			—
		—			ДА
		—			ДБ
		—			ДВ

* Данный раздел (подраздел, пункт) исключен, т. к. его положения носят поясняющий, справочный и рекомендательный характер.

** Данный раздел (подраздел, пункт) исключен, т. к. его положения размещены в других разделах настоящего стандарта.

УДК 691.175:006.354 МКС 19.020

Ключевые слова: композиты полимерные, работа расслоения, мода II, сдвиг

Редактор *Е.И. Мосур*
Технические редакторы *В.Н. Прусакова, И.Е. Черепкова*
Корректор *Е.М. Поляченко*
Компьютерная верстка *Д.В. Кардановской*

Сдано в набор 23.10.2019. Подписано в печать 25.11.2019. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,90.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

ИД «Юриспруденция», 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 11.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

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