

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕВОЛОКНА ПО ТИПУ РАССЛОЕНИЯ

© 2021

С. А. Чернякин старший преподаватель кафедры космического машиностроения имени Генерального конструктора Д.И. Козлова; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; chernyakin-sa@mail.ru

В работе изложены результаты исследования трещиностойкости композиционных материалов по типу расслоения. Целью работы является изучение закономерностей роста расслоений и параметров механики разрушения в современных полимерных композиционных материалах на основе углеволокна. Данный тип композиционных материалов активно применяется в высоконагруженных конструкциях изделий аэрокосмической отрасли. Объектом исследования являются современные полимерные композиционные материалы. В работе описана методика изготовления образцов для испытаний по технологии вакуумной инфузии. Экспериментальные исследования процесса роста расслоений по модам I и II проводились на современном испытательном оборудовании с применением специальных образцов в виде двойной консольной балки. Данный тип образцов часто применяется исследователями для отработки численных моделей. В рамках исследования были получены критические значения вязкости разрушения, а также зависимости «нагрузка-перемещение» для двух типов материала – однонаправленного и тканого. Исследования шлифов испытанных образцов на оптическом микроскопе позволили выявить характерные механизмы разрушения структуры материала.

Композиционные материалы; трещиностойкость; расслоение; испытательное оборудование; шлифы; интенсивность освобождения энергии; разрушение

Цитирование: Чернякин С.А. Экспериментальное исследование трещиностойкости полимерных композиционных материалов на основе углеволокна по типу расслоения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 1. С. 97-108. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-1-97-108

Введение

В современных конструкциях из полимерных волокнистых композиционных материалов в силу нарушения технологии производства, под влиянием внешних воздействий, а также в силу отсутствия надёжной системы мониторинга избежать наличия такого опасного дефекта как расслоение не получается. Поэтому возникает необходимость оценки влияния подобного рода дефектов на прочность и надёжность композитных конструкций. Экспериментальные исследования, направленные на выяснение истинных процессов деформирования и разрушения полимерных композиционных материалов, являются одним из наиболее достоверных методов оценки прочности и долговечности реальных конструкций и их элементов.

Испытание по определению вязкости разрушения по моде I (нормальный отрыв) традиционно считается наиболее важной характеристикой расслоения в композиционных материалах. Для этого наиболее часто используется образец в форме двойной консольной балки (ДСВ-образец), нагруженной двумя противоположно направленными силами на её концах через специального вида блоки или специальные ролевые петли. Процесс подготовки и проведения испытаний в настоящее время стандартизован американским сообществом по испытаниям и материалам ASTM D5528 [1]. Простота проведения данного испытания и однозначно определённый вид нагружения по моде I поз-

воляют применять данный стандарт для исследования вязкости разрушения в любых современных композиционных материалах.

Интенсивность освобождения энергии G_I есть функция нагрузки, перемещений и длины расслоения. К упомянутым параметрам нередко добавляются и другие конструктивные параметры или параметры материала, оказывающие своё воздействие на значения G_I в процессе проведения испытания. К одним из таких эффектов можно отнести появление связей в окрестности фронта расслоения ввиду вытягивания отдельных волокон из монослоя. Наиболее часто используемыми методами оценки интенсивности освобождения энергии является метод податливости, введённый в работе [2], и модифицированный метод податливости, предложенный в работе [3]. Отмечается, что использование последнего метода является более предпочтительным, поскольку он даёт консервативные результаты. Следует также подчеркнуть, что большинство исследователей используют образец в форме двойной консольной балки для верификации предлагаемых математических моделей, направленных на исследование процессов роста расслоений в композиционных материалах с помощью аналитических или численных методов. В работах [4; 5] детально рассмотрены преимущества и недостатки предложенных различными авторами подходов к определению вязкости межслойного разрушения по моде I.

При испытаниях по моде II (сдвиг) в процесс разрушения многослойного композиционного материала вовлечены две скользящие друг относительно друга поверхности, взаимодействие между которыми приводит к распространению расслоения (ENF-образец). В настоящее время данный тип испытаний также стандартизован и описан в соответствующем стандарте ASTM D 7905 [6]. Схема нагружения представляет собой трёхточечный изгиб балки с расслоением на конце, что, в свою очередь, позволяет реализовать условия разрушения по моде II.

Впервые данный вид испытаний был описан в работе [7], в которой авторы предложили такую же форму образца, как и в случае двухконсольной балки, что позволяет использовать балочную теорию для оценки значений интенсивности освобождения энергии. Достаточно большая жёсткость в этом случае также даёт возможность использовать метод податливости. В работе [7] авторами на основании классической балочной теории было предложено простое выражение для определения интенсивности освобождения энергии.

Следует отметить, что для описанного типа испытания, в особенности для композиционных материалов с хрупкой матрицей, рост расслоения происходит внезапно и неустойчиво, что, в свою очередь, сопровождается значительным падением нагрузки в процессе испытания. В работе [8] отмечается, что значение интенсивности освобождения энергии при распространении расслоения было эквивалентно значению интенсивности освобождения энергии при стагнации расслоения. Первое из указанных значений обычно характеризует динамическое поведение материала при неустойчивом росте расслоения. С другой стороны, авторами работы [9] была предложена методика испытания, в которой наблюдался устойчивый рост расслоения. Испытания проводились с использованием специальных датчиков перемещений при постоянной скорости приложения сдвиговых перемещений, т.е. относительных сдвиговых перемещений между верхней и нижней частями образца на конце области с расслоением.

Методика изготовления образцов из композиционных материалов

Наиболее распространёнными методами изготовления образцов являются метод ручной выкладки и метод вакуумной инфузии. Для экспериментальных исследований был выбран метод вакуумной инфузии.

Основу однонаправленного материала составляет однонаправленная углеткань 12К-300-200 с поверхностной плотностью 230 г/м^2 полотняного плетения (вплетена стеклянная уточная нить), с количеством филаментов в одном пучке нити – 12К.

Основу тканого материала составляет двунаправленная ткань 1К-1000-132 с поверхностной плотностью 132 г/м^2 полотняного плетения с количеством филаментов в одном пучке нити – 1К.

Для формования заготовок и последующего получения образцов заданной толщины и формы сначала производится раскрой цельного полотна выбранного материала, которое разрезается на заготовки для изготовления пластин размером $180 \times 350 \text{ мм}$.

При формировании так называемого «пакета», представляющего собой уложенные под определёнными углами относительного исходного отсчётного направления, слои ткани укладываются на предварительно обработанную специальным веществом (антиадгезивом) поверхность, что предотвращает склеивание материала с формообразующей оснасткой. Число и ориентация слоёв в каждом конкретном случае выбираются исходя из исследуемых экспериментальным путём физико-механических характеристик материала. Следует отметить, что для создания искусственного расслоения использовалась специальная тонкая плёнка, пропитанная антиадгезионным веществом для предотвращения смыкания берегов расслоения в процессе пропитки.

Сверху выложенный таким образом набор слоёв покрывается так называемой «жертвенной» тканью для обеспечения отделения верхней поверхности изготавливаемой заготовки от проводящего слоя после полимеризации.

Рядом со слоями ткани располагаются трубка подвода смолы и трубка, ведущая к вакуумной станции. Уплотнение краёв оснастки проводится герметизирующим жгутом, препятствующим проникновению воздуха в процессе создания вакуума. Для равномерного распределения смолы по всей поверхности заготовки, а также равномерной её пропитки пакет накрывается проводящей тканью. Сверху всё накрывается вакуумной плёнкой с толщиной, обеспечивающей достаточную жёсткость с целью предотвращения её повреждения и, как следствие, нарушения технологии и процессе изготовления заготовки.

Для пропитки ткани использовалось связующее, составленное из 100 частей смолы SICOMIN SR8100 и 22 частей отвердителя SD8823. При определении количества компонентов смеси использовались аналитические весы. Время жизни жидкого связующего составляло 4 часа. После полимеризации связующего следовал этап разборки вакуумного пакета и освобождения сформированного ламината из оснастки с отделением жертвенных слоёв. Далее проводилась механическая обработка полученной заготовки с целью получения образцов необходимого размера.

Методика проведения испытаний

Для оценки несущей способности композитных конструкций с расслоением, а также оценки склонности расслоения к росту автором работы проводилось экспериментальное исследование интенсивности освобождения энергии в полимерных композиционных материалах на примере тканого и однонаправленного углепластика.

Испытания на определение интенсивности освобождения энергии по моде I проводились в соответствии с требованиями, изложенными в ASTM D 5528 [1]. Для создания нагрузок, соответствующих первой моде разрушения, к образцу приклеиваются специальные блоки, которые призваны передавать нагрузку с траверс испытательной машины на образец. Их крепление к траверсе осуществляется шарнирно через втулки посредством специального переходника, а к образцу – посредством клеевого соединения.

Значение вязкости разрушения вычисляют на основании диаграммы «нагрузка-перемещение» при возрастании нагрузки от нулевого значения до значения, соответствующего прорастанию искусственно созданного расслоения на величину от 3 до 5 мм.

Перед испытанием одна из боковых кромок образца была покрашена белой краской на водной основе. На неё после отверждения были нанесены маркеры (метки), начиная от номинальной длины трещины (конца искусственного расслоения) по следующей схеме: первые 5 мм метки ставились каждый 1 мм, далее метки ставились через 5 мм. Во всех случаях длина первоначального расслоения составляла 50 мм. В ходе испытания по данным маркерам отслеживался процесс роста расслоения с помощью видеокамеры. В момент достижения трещиной заданного маркера оператором фиксировались значения силы и соответствующего ему значения перемещений точек приложения. По полученным данным оценивались значения G_{Ic} (вязкость разрушения). Общий вид образца с нанесёнными маркерами представлен на рис. 1.

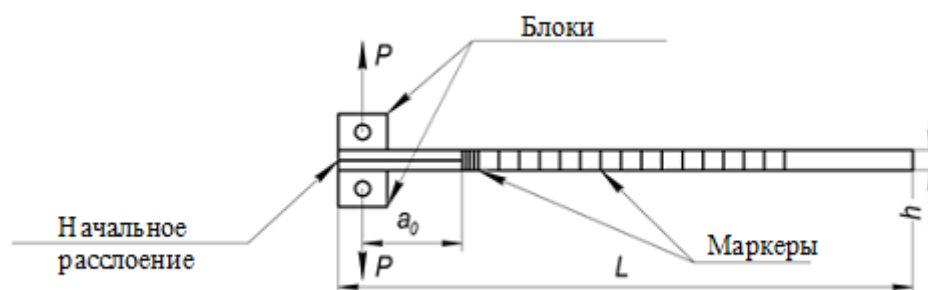


Рис. 1. Схема образца

Для оценки трещиностойкости по моде II автором проводились испытания образцов (ENF-образцы) в виде балок с расслоением при трёхточечном изгибе (End notched Flexure). Процедура проведения испытания базировалась на стандарте ASTM D 7905 [6]. В соответствии с ним изготавливались похожие по сравнению с предыдущим испытанием образцы.

В рамках данного испытания определению подлежало критическое значение интенсивности освобождения энергии для моды II (G_{IIc}) с помощью метода калибровки податливости. При реализации данного метода и вычислении отмеченных значений каждый из образцов подвергался двум нагружениям на заранее рассчитанные уровни нагрузок. Данные нагрузки выбирались таким образом, чтобы их величина соответствовала 50% от значений предельной нагрузки, характеризующей момент страгивания расслоения для двух заданных длин расслоения ($a_1 = 20$ мм, $a_2 = 40$ мм). Третье нагружение проводилось при длине расслоения $a_0 = 30$ мм вплоть до момента, когда визуально наблюдалось страгивание расслоения. Значение нагрузки P_{max} , соответствующее данному явлению, регистрировалось и в дальнейшем использовалось для расчёта значений G_{IIc} .

Схема испытания, а также изображение испытываемого образца с нанесёнными маркерами приведены на рис. 2, 3.

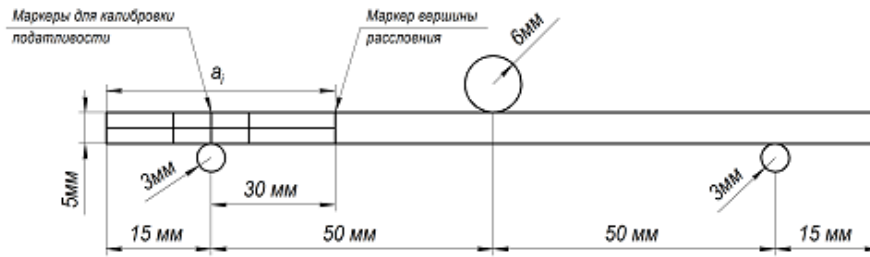


Рис. 2. Схема нагружения и характерные размеры ENF-образца

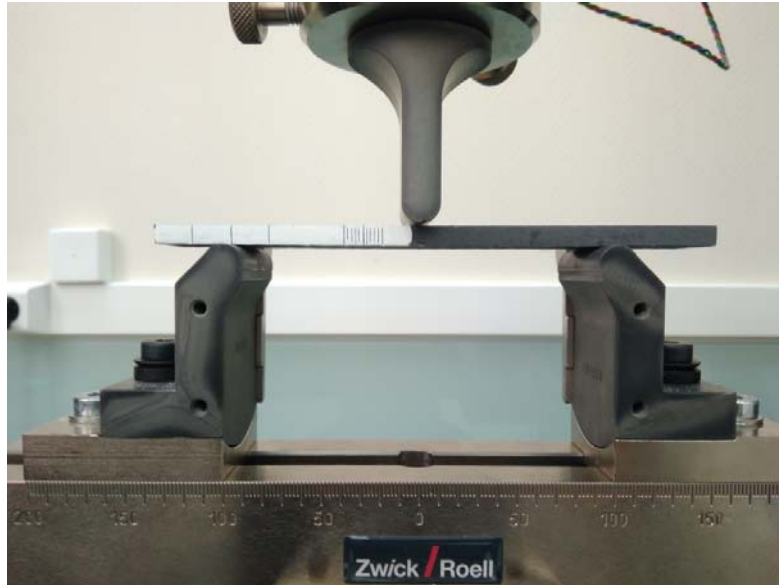


Рис. 3. Образец в испытательной оснастке

Результаты испытаний и их анализ

На рис. 4, 5 приведены полученные диаграммы «нагрузка-перемещение» соответственно для однонаправленного и тканого композиционного материала. В табл. 1 представлены полученные значения математического ожидания, среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации вязкости разрушения по моде I для однонаправленного и тканого материала.

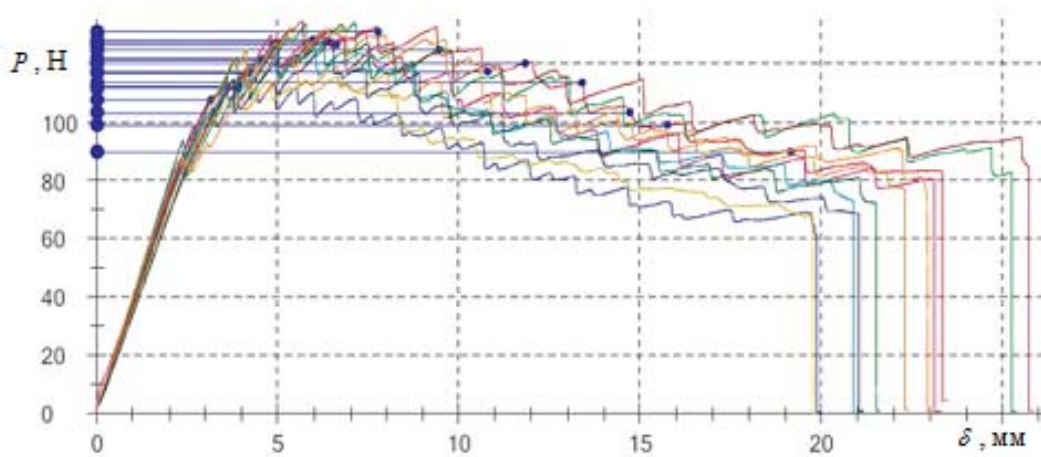


Рис. 4. Диаграммы нагрузка-перемещение для однонаправленного материала

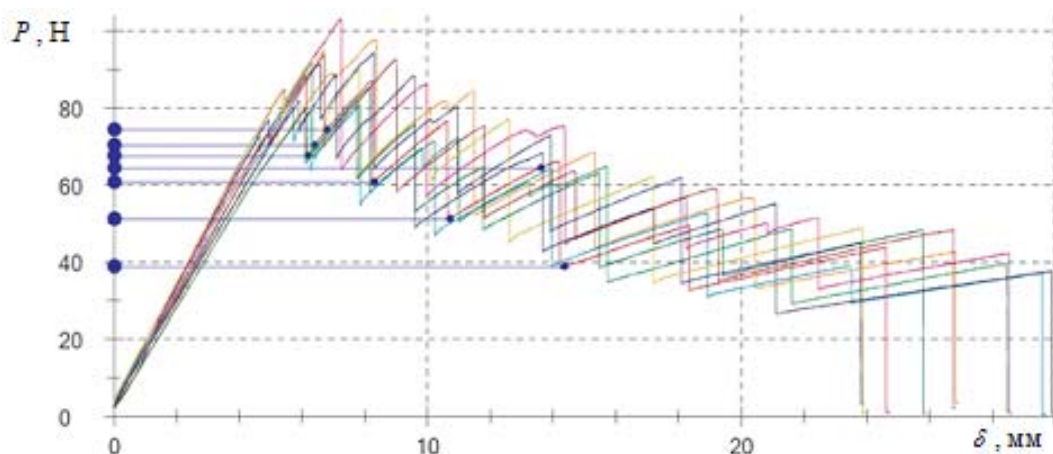


Рис. 5. Диаграммы нагрузка-перемещение для тканого материала

Таблица 1. Значения вязкости разрушения по моде I

Тип материала	Математическое ожидание, Н/мм	Среднеквадратическое отклонение, Н/мм	Коэффициент вариации, %
Однонаправленный	0,37	0,13	34,99
Тканый	0,49	0,06	11,67

При проведении испытаний образцов из однонаправленного материала происходил устойчивый рост расслоения, а именно постепенное увеличение его длины от инициатора по мере увеличения нагрузки. Данный вывод также можно сделать, анализируя полученные диаграммы «нагрузка-перемещение», на которых отсутствуют резкие (сильные) изменения по силе. Анализируя полученные R-кривые, можно заметить, что вязкость разрушения по мере увеличения длины расслоения также увеличивается, что, в свою очередь, является характерной особенностью однонаправленных материалов. Кроме того, в процессе испытания и по мере роста расслоения наблюдался эффект «fiber bridging» (рис. 6), заключающийся в образовании остаточных связей между берегами трещины расслоения. Механизм образования таких связей заключается в вытягивании отдельных волокон или пучков волокон из соседних слоёв. Происходит это из-за отсутствия чёткой границы раздела между соседними слоями в однонаправленных материалах. Для более подробного исследования поверхности разрушения и механизма роста расслоения после испытаний были выполнены шлифы боковой и торцевой поверхности образца (рис. 7, 8).

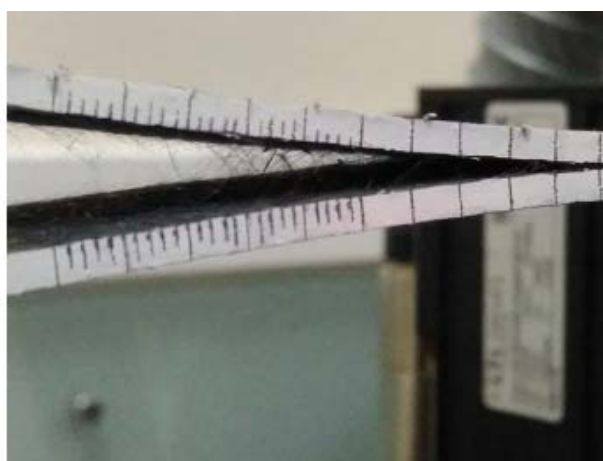


Рис. 6. Вытягивание волокон



Рис. 7. Изображение боковой поверхности образца из однонаправленного материала



Рис. 8. Изображение торцевой поверхности образца из однонаправленного материала:
1 – разрушение поверхности слоя, 2 – расслоение по нити утка, 3 – расслоение в слое

В результате испытаний установлено, что в приповерхностных к расслоению слоях присутствуют 3 вида разрушения:

- 1) разрушение поверхности слоя, заключающееся в растрескивании матрицы по границам волокон и отмеченного вытягивания волокон из соседних слоёв;
- 2) образование по границе нити утка расслоения, мигрирующее в соседние слои материала;
- 3) образование трещины расслоения непосредственно в слое материала, развивающейся по границам волокон и также приводящей к растрескиванию матрицы в прилегающих слоях.

Из вышесказанного следует несколько важных выводов:

- нити утка (если они есть) в однонаправленных материалах являются инициаторами расслоений в условиях нормального отрыва;
- кроме непосредственного повреждения материала трещиной расслоения, которое существенно снижает эффективные жесткостные и прочностные свойства, происходит также повреждение прилегающих слоёв, заключающееся в образовании дефек-

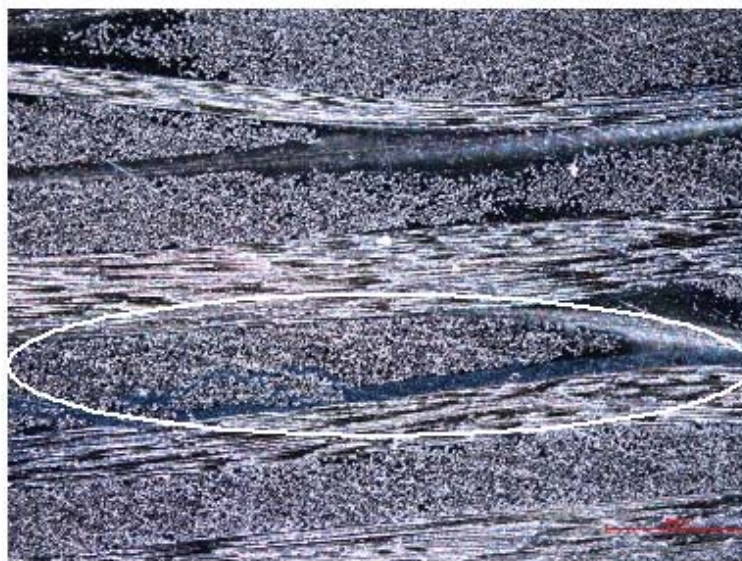
тов, которые могут в дальнейшем привести к полному исчерпанию несущей способности.

При испытаниях тканого материала эффектов, характерных для однонаправленных материалов, не наблюдалось. Анализируя полученные зависимости (рис. 4, 5), можно отметить, что для тканого материала характерен нестабильный рост расслоения. Это проявляется в скачкообразном подрастании трещины на значительную длину (порядка 15...20 мм) от предыдущего устойчивого равновесного состояния. Кроме того, для тканого материала значения интенсивности освобождения энергии, соответствующие этапу роста, были меньше, чем те же значения в момент страгивания трещины. В данном случае можно говорить о том, что данное обстоятельство является характерной особенностью тканого материала.

Для более детального исследования процесса роста расслоения в структуре материала были изготовлены шлифы. Изображения, полученные на электронном микроскопе, представлены на рис. 9.



a



б

Рис. 9. Боковая поверхность образца из тканого материала

Изучение шлифов показало:

- расслоение растёт преимущественно по границе слоёв материала в матрице;
- в некоторых случаях наблюдается рост расслоения в прилегающих слоях волокон, расположенных поперёк плоскости рисунка по границе отдельных волокон;
- в тканом материале расслоение прорастает в матрице в слоях с поперечным армированием;
- эффекта вытягивания волокон не наблюдалось.

Во всех испытаниях наблюдался описанный характер распространения расслоений, что позволяет сделать вывод о характерности этой формы разрушения для данного типа материала. Сравнивая значения коэффициентов вариации интенсивности освобождения энергии в первом и втором случае, установлено, что для тканого материала наблюдается меньший разброс. Это опять же говорит о характерности формы разрушения.

Полученные в результате испытаний ENF-образцов зависимости «нагрузка-прогиб» для однонаправленного и тканого материала представлены на рис. 10, 11.

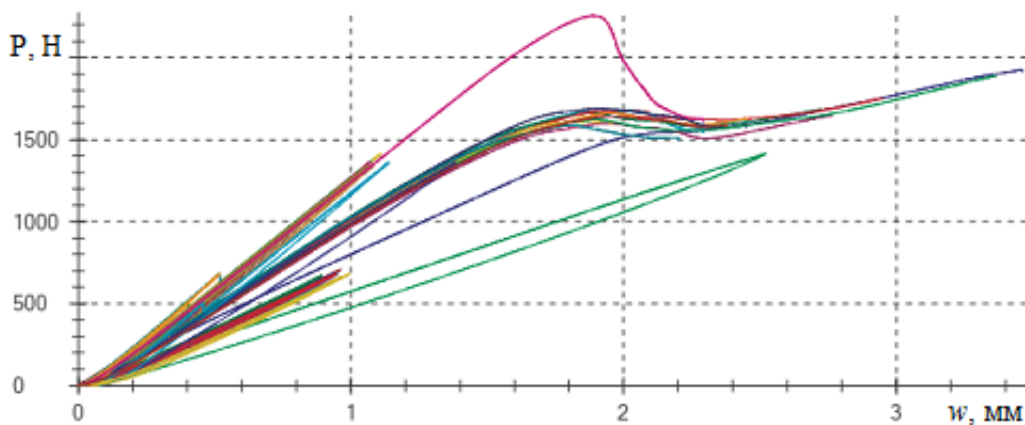


Рис. 10. Зависимость «нагрузка-прогиб» для однонаправленного материала

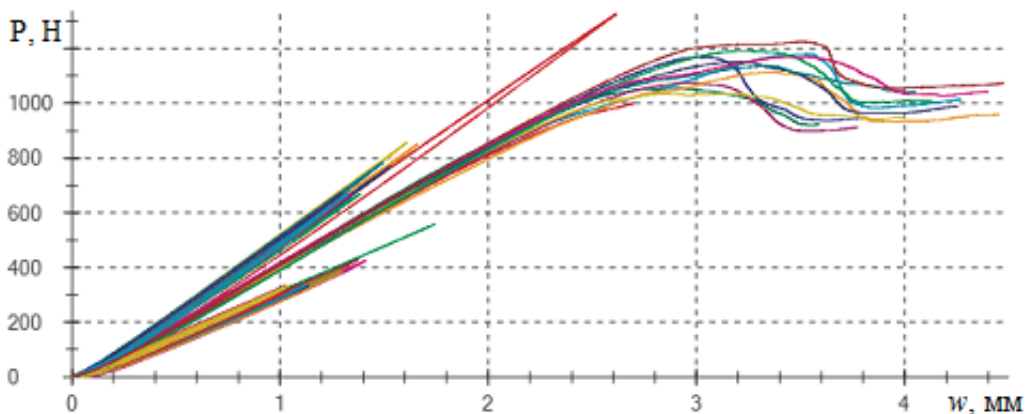


Рис. 11. Зависимость «нагрузка-прогиб» для тканого материала

В табл. 2 приведены полученные значения математического ожидания, среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации вязкости разрушения по моде II для однонаправленного и тканого материала.

Таблица 2. Значения вязкости разрушения по моде II

Тип материала	Математическое ожидание, Н/мм	Среднеквадратическое отклонение, Н/мм	Коэффициент вариации, %
Однонаправленный	1,44	0,065	4,54
Тканый	1,265	0,171	13,52

В процессе проведения испытания отмечался устойчивый рост расслоения. Однако стоит заметить, что наблюдение процесса роста расслоения является достаточно трудоёмким, поскольку в данном случае как такового раскрытия берегов не происходит. Поэтому рост расслоения отслеживался лишь по взаимному смещению маркеров на боковой поверхности.

Заключение

В работе проведено подробное исследование трещиностойкости двух типов композиционных материалов и процессов роста расслоений в них по модам I и II. При исследовании роста расслоения по моде I для однонаправленного материала отмечены характерные особенности распространения – наличие зон вытягивания волокон, приповерхностное разрушение материала, миграция трещины между слоями материала. Для тканого материала при исследовании структуры материала образцов после испытаний установлены два основных типа разрушения – распространение расслоения по границе слоёв и разрушение отдельных пучков волокон на берегах расслоения. При проведении испытаний материалов по моде II рост расслоения оценивался по смещению берегов расслоения друг относительно друга от сдвиговых напряжений. Для всех проведённых испытаний представлены полученные зависимости «нагрузка-перемещение» и значения вязкостей разрушения.

Библиографический список

1. ASTM D5528-13. Method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. DOI: 10.1520/D5528-13
2. Berry J.P. Determination of fracture surface energies by the cleavage technique // *Journal of Applied Physics*. 1963. V. 34, Iss. 1. P. 62-68. DOI: 10.1063/1.1729091
3. Hashemi S., Kinloch A.J., Williams J.G. Corrections needed in double-cantilever beam tests for assessing the interlaminar failure of fibre-composites // *Journal of Materials Science Letters*. 1989. V. 8, Iss. 2. P. 125-129. DOI: 10.1007/BF00730701
4. Nasuha N., Azmi A.I., Tan C.L. A review on mode-I interlaminar fracture toughness of fibre reinforced composites // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 908, Iss. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/908/1/012024
5. Zhu X.K., Joyce J.A. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization // *Engineering Fracture Mechanics*. 2012. V. 85. P. 1-46. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2012.02.001
6. ASTM D7905 / D7905M-19e1. Standard test method for determination of the mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. DOI: 10.1520/D7905_D7905M-19E01
7. Russell A.J., Street K.N. Factors affecting the interlaminar fracture energy of graphite/epoxy laminates // *Proceedings of the 4th International Conference on Composite*

Materials «Progress in Science and Engineering of Composites» (Oct. 25-28, 1982, Tokyo, Japan). P. 279-286.

8. Vu-Khanh T. Crack-arrest study in mode II delamination in composites // *Polymer Composites*. 1987. V. 8, Iss. 5. P. 331-341. DOI: 10.1002/pc.750080508

9. Kageyama K., Kikuchi M., Yanagisawa N. Stabilized end notched flexure test: characterization of mode II interlaminar crack growth // *Third Symposium on Composite Materials: Fatigue and Fracture* (November, 6-7, 1989, Lake Buena Vista, FL, USA). P. 210-225. DOI: 10.1520/STP17720S

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CFRP FRACTURE TOUGHNESS BY DELAMINATION TYPE

© 2021

S. A. Chernyakin Senior Lecturer of the Department of Space Engineering named after Chief Designer D.I. Kozlov; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; chernyakin-sa@mail.ru

The results of analyzing fracture toughness in carbon fiber-reinforced plastics by the type of delamination are presented in the article. The goal of this paper is investigation of delamination propagation process and fracture mechanics parameters in modern CFRPs. This type of composite materials is extensively used in high load aerospace structures. Modern polymer composite materials are the subject of our research. A technique of manufacturing specimens for testing by the vacuum infusion process is presented in the paper. Experimental investigation of delamination propagation process by mode I and II was performed with the aid of up-to-date testing equipment using a special type of specimens such as a double cantilever beam. Researchers usually use this type of specimen for the validation of their numerical models. Critical values of energy release rate and load-displacement curves were obtained for two types of material – unidirectional and woven. Examination of microscopic sections of the tested specimens using an optical microscope allowed us to identify the specific fracture mechanisms of material structure.

Composite materials; fracture toughness; delamination; testing equipment; microscopic sections; energy release rate; fracture

Citation: Chernyakin S.A. Experimental investigation of CFRP fracture toughness by delamination type. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 1. P. 97-108. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-1-97-108

References

1. ASTM D5528-13. Method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. DOI: 10.1520/D5528-13
2. Berry J.P. Determination of fracture surface energies by the cleavage technique. *Journal of Applied Physics*. 1963. V. 34, Iss. 1. P. 62-68. DOI: 10.1063/1.1729091
3. Hashemi S., Kinloch A.J., Williams J.G. Corrections needed in double-cantilever beam tests for assessing the interlaminar failure of fibre-composites. *Journal of Materials Science Letters*. 1989. V. 8, Iss. 2. P. 125-129. DOI: 10.1007/BF00730701
4. Nasuha N., Azmi A.I., Tan C.L. A review on mode-I interlaminar fracture toughness of fibre reinforced composites. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 908, Iss. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/908/1/012024

5. Zhu X.K., Joyce J.A. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. *Engineering Fracture Mechanics*. 2012. V. 85. P. 1-46. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2012.02.001

6. ASTM D7905 / D7905M-19e1. Standard test method for determination of the mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. DOI: 10.1520/D7905_D7905M-19E01

7. Russell A.J., Street K.N. Factors affecting the interlaminar fracture energy of graphite/epoxy laminates. *Proceedings of the 4th International Conference on Composite Materials «Progress in Science and Engineering of Composites» (Oct. 25-28, 1982, Tokyo, Japan)*. P. 279-286.

8. Vu-Khanh T. Crack-arrest study in mode II delamination in composites. *Polymer Composites*. 1987. V. 8, Iss. 5. P. 331-341. DOI: 10.1002/pc.750080508

9. Kageyama K., Kikuchi M., Yanagisawa N. Stabilized end notched flexure test: characterization of mode II interlaminar crack growth. *Third Symposium on Composite Materials: Fatigue and Fracture (November, 6-7, 1989, Lake Buena Vista, FL, USA)*. P. 210-225. DOI: 10.1520/STP17720S