

ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО МОДЕ П С ПРИМЕНЕНИЕ ENF-МЕТОДА

Т.Д. Каримбаев, *д-р техн. наук, профессор, начальник отдела*
 Б. Мыктыбеков, *канд. техн. наук, начальник сектора*
 М.А. Мезенцев, *начальник сектора*
 Д.С. Пальчиков, *начальник сектора*
 ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»
 (Россия, г. Москва)

DOI: 10.24411/2500-1000-2020-11039

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-18071\19.

Аннотация. Одной из важнейших характеристик армированных керамических композиционных материалов (ККМ) являются характеристики трещиностойкости. Именно ими определяется способность ККМ сопротивляться росту трещины, которая может возникнуть как на стадии изготовления детали, так и в процессе эксплуатации при действии эксплуатационных нагрузок. В рамках настоящей работы отработан метод определения характеристики трещиностойкости слоистого композиционного материала при смещении поверхности трещины по типу II. Метод показал свою работоспособность и достаточную стабильность получаемых результатов для армированных композиционных материалов, в том числе керамических.

Ключевые слова: керамический композиционный материал, трещиностойкость, исследования, испытания.

Применительно к слоистым керамическим композиционным материалам, трещиностойкость характеризуется величинами критической скорости высвобождения упругой энергии деформации (G_I , G_{II} , G_{III}), соответствующими трем основным

видам смещения поверхности трещины (рис. 1). Характеристику G также называют вязкостью разрушения. Данные характеристики по существу являются константами материала и используются для описания различных моделей разрушения.

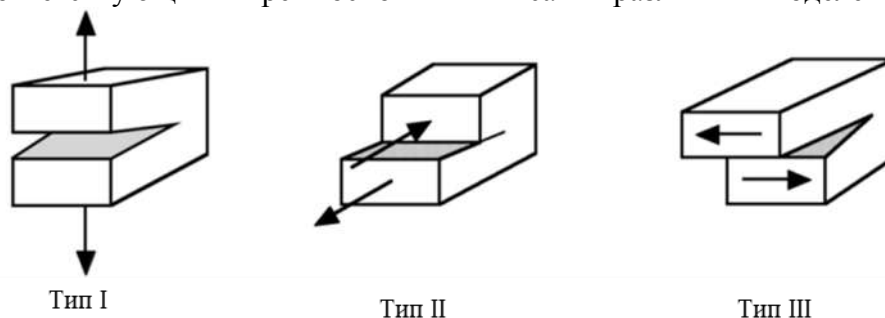


Рис. 1. Основные виды смещения поверхностей трещины: нормальный отрыв (I), поперечный (II) и продольный (III) сдвиг

Скорость высвобождения упругой энергии G представляет собой потерю внутренней энергии dU на единицу ширины образца при бесконечно малом увеличении длины трещины da , растущей при приложении постоянного перемещения. Ско-

рость высвобождения энергии может быть выражена:

$$G = -\frac{1}{b} \frac{dU}{da} \quad (1)$$

Величину G определяют экспериментально для каждого вида смещения поверхностей трещины. В общем случае, испытания ККМ на трещиностойкость сводятся к испытаниям образца с начальным расслоением. Для каждого типа смещения поверхности трещины используется соответствующая схема нагружения. В рамках настоящей работы рассмотрено экспериментальное определение и отработка методики испытаний трещиностойкости на относительно дешевых полимерных ком-

позиционных материалах, армированных непрерывным волокном при смещении поверхности трещины по типу II.

Методика проведения испытаний

Методы определения характеристики трещиностойкости при смещении поверхности трещины по типу II (ГПс) основаны на испытаниях плоского образца с начальным расслоением, получаемым на стадии изготовления, на изгиб: трехточечный, консольный или четырехточечный (рис. 2).

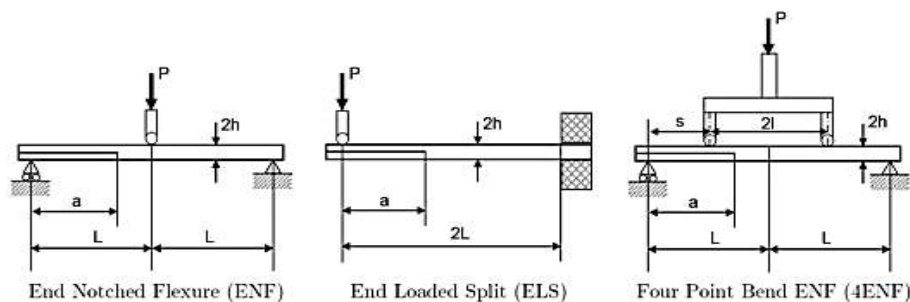


Рис. 2. Схемы нагружения для определения характеристик трещиностойкости по типу II

При использовании данных схем нагружения, реализуется поперечный сдвиг поверхности трещины. Использованный в рамках настоящей работы метод определения ГПс при трехточечном изгибе образца с начальным расслоением регламентирован ГОСТ 33685-2015 [1] и ASTM D7905 [2] и носит название End Notched Flexure (ENF). По результатам испытаний данным методом определяют значение ГПс только при первом смещении трещины, так как дальнейший рост трещины при данной схеме нагружения не стабилен.

Непосредственно перед испытанием для каждого образца определяют поправку на податливость путем серии нагружений на нагрузках, не превышающих нагрузку страгивания трещины. Для этого образец устанавливают в приспособление для

трехточечного изгиба так, чтобы длина трещины составляла $a_0=15, 20, 25, 35$ и 40 мм. Для каждого положения образца (т.е. различной длины трещины) определяют податливость C , мм/Н, согласно соотношению:

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

где δ - перемещение нагружающей опоры, мм; P - нагрузка, Н.

По полученным данным строят зависимость податливости образца (C) от куба длины начальной трещины (a^3), по которой методом наименьших квадратов определяют коэффициенты C_0 и m уравнения (рис. 3).

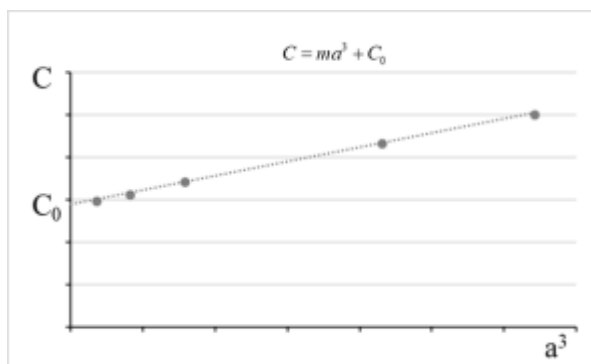


Рис. 3. Калибровка по податливости

После калибровки по податливости проводят испытания образца до смещения трещины. Скорость высвобождения упругой энергии деформации при смещении трещины по типу II определяется соотношением:

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

где C_0 , m – коэффициенты уравнения калибровочной зависимости, P – нагрузка, Н; b – ширина образца, мм; C – податливость образца, мм/Н

Экспериментальная часть

В рамках данной работы испытания образцов КМ на трещиностойкость при продольном сдвиге (тип II) проводились так

называемым ENF методом на образцах из непрерывно армированного композиционного материала. В качестве наполнителя использовалась равнопрочная углеродная ткань УТО-1000, в качестве матрицы – связующее Т-26. На рисунке 4 представлен образец с начальным расслоением в испытательной оснастке. Каждый образец предварительно был нагружен с различным значением начальной длины трещины ($a_0=15, 20, 25, 35, 40$ мм) для последующего определения зависимости податливости от длины трещины и вычисления поправки на податливость. Предварительные нагружения осуществлялись до нагрузки $P = 500$ Н при расстоянии между опорами $L = 100$ мм.



Рис. 4. Образец ПКМ №4 с начальным расслоением в испытательной оснастке для испытаний на трещиностойкость по типу II

Податливость для каждого длины трещины определялась как отношение перемещения к нагрузке (2). Зависимость податливости от длины трещины для образца №1 (УТО1000/Т26) представлена на рисунке 5.

По уравнению полученной прямой определены коэффициенты C_0 и m – поправки необходимые для расчета искомой характеристики ГИС (соотношение 3).

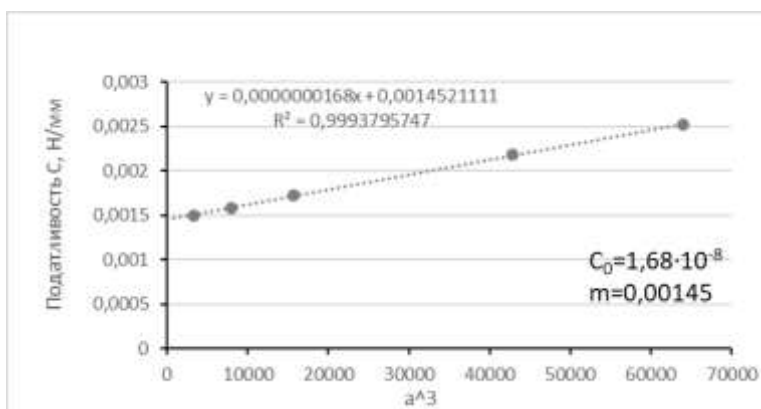


Рис. 5. Зависимость податливости образца от начальной длины трещины

После определения указанных коэффициентов следовали непосредственно испытания на трещиностойкость. Образец устанавливался на опоры испытательной оснастки таким образом, чтобы длина начального расслоения a_0 (в данном случае рас-

стояние от опоры до вершины трещины) составляло 25 мм, и нагружается до момента смещения трещины. На рисунке 6 представлены диаграммы нагружения образцов исследуемого углепластика.

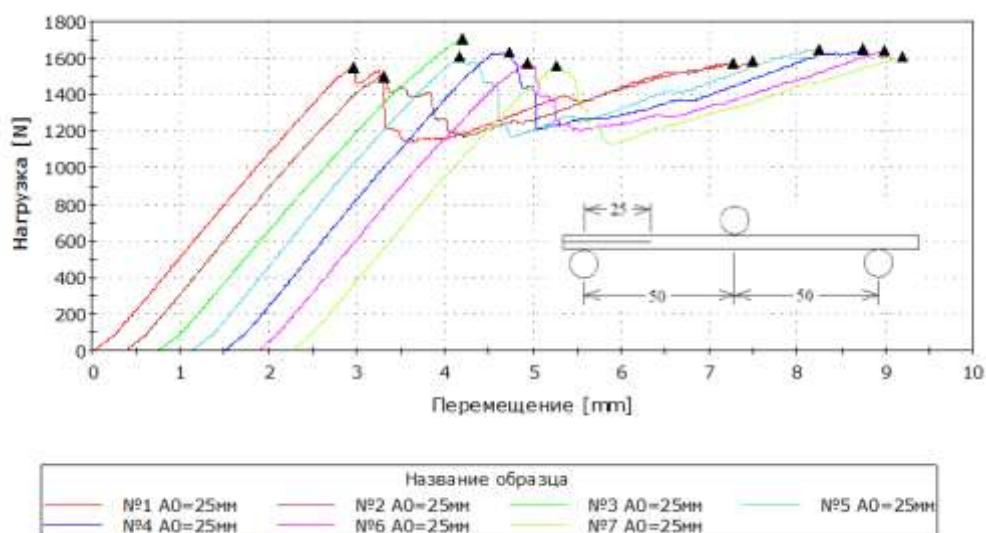


Рис. 6. Диаграмма нагружения образцов ПКМ с трещиной при трехточечном изгибе

Значения характеристики трещиностойкости определялись из соотношения (3) и представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов углепластика (УТО1000/Г26) на трещиностойкость при типу II

Метка образца	Ширина [mm]	Толщина [mm]	Макс. Нагрузка [N]	Перемещение [mm]	Податливость C [mm/N]	GIIc, кДж/м ²
№1 A0=25мм	25	4,3	1 548,6	2,96	0,00173	1,569
№2 A0=25мм	25	4,3	1 502,9	2,923	0,00172	1,679
№3 A0=25мм	25,1	4,2	1 705,4	3,437	0,00176	2,133
№4 A0=25мм	25,1	4,3	1 635,6	3,224	0,00171	1,291
№5 A0=25мм	25,1	4,3	1 611,2	3,033	0,00168	1,086
№6 A0=25мм	25	4,3	1 574,0	3,04	0,00174	1,208
№7 A0=25мм	25,1	4,3	1 560,2	2,997	0,00173	1,193
Среднее					0,00173	1,451
Коэффициент вариации, %					1,44439	20,228

Результаты работы

В рамках настоящей работы отработан метод определения характеристики трещиностойкости на полимерных композиционных материалах при смещении поверхности трещины по типу II. Метод показал свою работоспособность и достаточную стабильность получаемых результатов для полимерных композиционных материалов и может быть применен для определения трещиностойкости керамических композиционных материалов типа C/SiC и SiC/SiC

Как было упомянуто ранее, характеристики трещиностойкости используются для описания различных моделей разрушения. Одной из таких моделей является так называемый «В-К критерий разрушения» [3]:

$$G_c = G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic})(G_{II} / G_T)^\eta \quad (4)$$

где G_{Ic} – критическая скорость высвобождения упругой энергии деформации при смещении трещины по типу I; G_{IIc} – критическая скорость высвобождения упругой энергии деформации при смещении трещины по типу II; G_T – общая действующая энергия; G_c – общая критическая энергия.

$$G_T = G_I + G_{II} \quad (5)$$

$$G_c = G_{Ic} + G_{IIc} \quad (6)$$

Коэффициент η определяется как степень аппроксимирующей кривой зависимости $G_c(G_{II}/G_T)$, приведенной на рисунке 7.

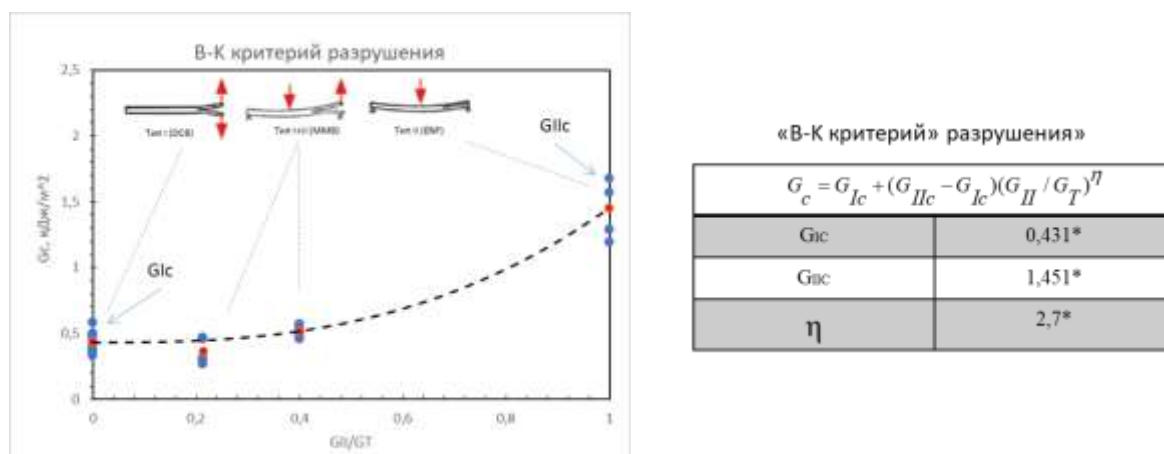


Рис. 7. Параметры «В-К» критерия разрушения

Таким образом, полученная в рамках настоящей работы характеристика (G_{II}), в купе с ранее проведенными экспериментами по определению характеристик G_{Ic} и G_{IIc} , пригодна для использования и формирования указанного критерия для арми-

рованных композиционных материалов, в том числе керамических, что в последующем позволит провести расчетное моделирование роста трещины в образцах и деталях из керамического композиционного материала.

Библиографический список

- ГОСТ 33685-2015. Метод определения удельной работы расслоения в условиях сдвига G_{IIc} .
- ASTM D7905-19. Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. Vol. 15.03.2019
- Krueger R. Computational fracture mechanics for composites // Materials science. – 2006.

INVESTIGATION OF CRACKING RESISTANCE OF REINFORCED COMPOSITE MATERIALS ACCORDING TO MODE II USING THE ENF METHOD

T.D. Karymbayev, *Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department*

B. Myktybekov, *Candidate of Technical Sciences, Head of Sector*

M.A. Mezentsev, *head of sector*

D.S. Palchikov, *head of sector*

Central Institute of Aviation Motors after Baranov P.

(Russia, Moscow)

***Abstract.** Crack resistance is one of the most important characteristics of reinforced ceramic composite materials (CMC). It is they who determine the ability of the CMC to resist crack growth, which can occur both at the stage of manufacturing a part and during operation under the action of operational loads. Within the framework of this work, a method has been developed for determining the characteristics of crack resistance of a layered composite material with a type II displacement of the crack surface. The method has shown its efficiency and sufficient stability of the results obtained for reinforced composite materials, including ceramic.*

***Keywords:** ceramic matrix composite, crack resistance, research, testing.*