

Численная оценка устойчивости к межслоевому росту трещин термопластичных армированных полимерных композиционных материалов с использованием экспериментально определенных параметров когезионной зоны

Г. В. Новиков,* П. Г. Бабаевский,† Н. В. Салиенко‡

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ),
Институт № 11, кафедра технологии композиционных материалов,
конструкций и микросистем*

Россия, 121552, Москва, ул. Оршанская, д. 3

(Статья поступила 25.02.2020; подписана в печать 16.03.2020)

Показано, что конечно-элементная 3D модель когезионной зоны, разработанная в пакете прикладных программ ANSYS® для образца в форме ДКБ, расслаиваемого по моде I, применима к оценке трещиностойкости перспективных для использования в авиа-космической технике слоистых армированных ПКМ. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментально полученными данными. В модели использованы два разных по природе и составу современных слоистых армированных ПКМ на основе угле- и стеклотканей и псевдохрупких термопластичных матриц — полиэфирэфиркетон и поликапроамид. Вариацией длины когезионной зоны, рассчитанной по экспериментально определенным параметрам межслоевой трещиностойкости (интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины и локальной когезионной прочности материала) осуществлен подбор минимально необходимого размера и числа интерфейсных (когезионных) элементов, обеспечивающих достаточную высокую точность вычислений основных параметров трещиностойкости, при минимизации объема вычислений.

PACS: 89.20.rg

УДК: 620.22

Ключевые слова: двухконсольная балка (ДКБ), полимерный композиционный материал (ПКМ), углекомпозит (УК), стеклокомпозит (СК), полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), поликапроамид (ПКА), линейно-упругая механика разрушения (ЛУМР), модель когезионной зоны (ЗКЗ), закон когезионной зоны (МКЗ), метод конечных элементов (МКЭ), интерфейсный элемент (ИЭ).

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшие проблемы в использовании слоистых ПКМ на основе армирующих тканей и полимерных матриц в авиа-космической технике обусловлены возникновением и развитием межслоевых дефектов (трещин) в полимерной матрице и на границе ее контакта с армирующей тканью вследствие воздействия как остаточных напряжений, обусловленных химическими и термическими усадками в процессах производства элементов конструкций, так и внешних нагрузок и факторов космического пространства при их эксплуатации [1, 2]. Повысить прогнозируемость и надежность эксплуатации таких материалов и конструкций в существенной степени позволяет правильная оценка показателей межслоевой трещиностойкости, т.е. сопротивления возникновению и росту трещин с использованием подходов линейной упругой механики трещин (ЛУМР). Это становится возможным благодаря разработке численного метода оценки трещиностойкости методом конечных элементов (МКЭ) с использованием, применительно к слоистым системам, модели когезионной зоны (МКЗ) [3, 4, 5, 6, 7, 8]. В МКЗ, имплантированной в МКЭ, когезионная зона (КЗ) рассматривает-

ся как тонкий слой, в котором действуют когезионные силы (силы сцепления) впереди кончика трещины или в любом другом месте концентрации напряжения, что позволяет определять условия инициирования и роста не только существующей трещины, но и возникновения новых межслоевых трещин, что аналитически делать в настоящее время не представляется возможным. В основе этой модели лежат разработанные в рамках ЛУМР Баренблаттом и Дагдейлом физические (микромеханические) модели зоны, соответственно, упругого предразрушения и пластического деформирования материала у кончика трещины, где теоретически локальные напряжения сингулярны [9, 10]. Физически КЗ представляет собой частично разрушенный или пластически деформированный слой материала, сохраняющий определенную когезионную прочность. Поведение КЗ и в физических, и в численных моделях подчиняется определенному закону — закону когезионной зоны (ЗКЗ), связывающему локальное напряжение и локальную деформацию материала (раскрытие) КЗ. ЗКЗ в физических моделях Баренблатта и Дагдейла при заданной моде нагружения определяется механизмом локального предразрушения материала и имеет вид диаграмм упругого (хрупкого) и пластического разрушения соответственно, а в численном моделировании ЗКЗ может задаваться исходя из удобства расчетов. Для хрупкого или псевдохрупкого инициирования и роста трещины чаще всего используют физически обоснованный экспоненциальный ЗКЗ — близкое к линейному возрастание локального напряжения до предельного

*E-mail: ngv92@mail.ru

†E-mail: babaevskiy@matu.ru

‡E-mail: intdep@matu.ru

значения с последующим экспоненциальным спадом до нуля (рис. 1).

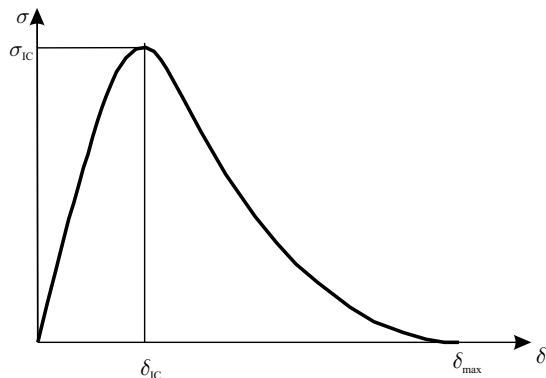


Рис. 1: Схема экспоненциального ЗКЗ и его основные характеристики: σ_{IC} — локальная когезионная прочность материала; δ_{IC} — локальное раскрытие КЗ при максимальном напряжении; δ_{max} — максимальное раскрытие КЗ

Размерные параметры КЗ — ее длина (l) и предельное раскрытие (δ_{max}) — определяются основными параметрами трещиностойкости — глобальным (интенсивностью высвобождения упругой энергии при росте трещины G_I) и локальным (когезионной прочностью КЗ σ_{IC}) в соответствии с формулами (1) и (2), аналитически выведенными в микромеханических моделях

$$l\dot{\epsilon}_\zeta = \frac{\pi EG_{IC}}{8 \sigma_I^2}, \quad (1)$$

$$\delta_{max} = \frac{G_{IC}}{e\sigma_I}, \quad (2)$$

где E — модуль упругости, e — основание натурального логарифма, равное 2.71. При этом производная G_{IC} по раскрытию

$$K3 \frac{dG_{IC}}{d\delta} = \sigma(\delta), \quad (3)$$

а величина площади под кривой ЗКЗ

$$\int_0^{\delta_{max}} \sigma(\delta) d\delta = G_{IC}. \quad (4)$$

В МКЗ, имплантированной в МКЭ, важнейшее значение имеет подбор минимального числа конечных элементов при оптимальном их размере для обеспечения достаточно высокой точности вычислений основных параметров трещиностойкости образцов слоистых ПКМ при сравнительно небольшом объеме вычислений. В работе [8] для этих целей в разработанной нами в рамках ЛУМР конечно-элементной 3D-модели расслоения по моде I образца слоистого углекомпозиата на основе углеродной ткани и хрупкой матрицы (отвержденной модельной амино-эпоксидной композиции) в виде двухконсольной балки (ДКБ) с предварительно заданной трещиной использована длина КЗ (l_{K3}),

рассчитанная по экспериментально определенным параметрам трещиностойкости (1) — глобальной интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины (G_{IC}) и локальной межслоевой когезионной прочности материала (σ_{IC}) при экспоненциальном ЗКЗ. В данной работе исследована возможность применения этого метода для численной оценки трещиностойкости получаемых по разным технологиям и различных по типу и составу слоистых ПКМ на основе угле- и стекло тканей и термопластичных полимерных матриц — полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) и поликапроамида (ПКА).

1. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Материалы

В работе численно моделировали и экспериментально исследовали два типа слоистых ПКМ:

1. Углекомпозит (УК) на основе сухого препрега Терах®-Е TRCL РЕЕК-НТА40 с содержанием углеродных волокон Терах®-Е НТА40 ЗК (58 об.%) и термопластичной матрицы ПЭЭК (42%).
2. Стеклокомпозит (СК) из тканого полуфабриката ТОПАС-1, полученный по волоконной технологии на основе армирующих стеклянных и матричных поликапроамидных (ПКА) волокон с соотношением компонентов 65/35 об.%.

1.2. Численное моделирование

Для численных расчетов параметров трещиностойкости слоистых ПКМ с помощью имплантированной в МКЭ МКЗ использовали созданную в пакете прикладных программ ANSYS® 3D геометрическую модель образца в форме ДКБ, нагружаемой при растяжении (по моде нагружения I) [9]. Общий вид и размеры 3D модели ДКБ, соответствующей стандартному методу определения GIC для слоистых армированных ПКМ [11], с заданной начальной трещиной и когезионной зоной представлены на рис. 2 а, б.

3D модель разбивается на конечные, или интерфейсные элементы (ИЭ), которые располагаются в КЗ впереди фронта трещины, и с помощью командной строки программы задаются параметры ЗКЗ и упругие характеристики материала в различных направлениях по плоскостям (модули Юнга E_{11} , E_{22} , E_{33} , модули сдвига G_{11} , G_{12} , G_{13} и коэффициенты Пуассона ν_{12} , ν_{13} , ν_{23}). После введения граничных условий к краям трещины в образце ДКБ прикладывается нагрузка и задается их перемещение (глобальное раскрытие трещины). Зависимости нагрузки на края трещины от их перемещения рассчитываются по 3D модели с использованием задаваемого размера и числа ИЭ, расположенных на длине КЗ. В результате получается диаграмма

Таблица 1: Экспериментально определенные значения упругих констант слоистых ПКМ в различных направлениях по плоскостям

ПКМ	E, МПа			G, МПа			ν		
	E ₁₁	E ₂₂	E ₃₃	G ₁₁	G ₁₂	G ₁₃	ν ₁₂	ν ₁₃	ν ₂₃
УК	133	10.2	5.1	2.6	2.8	1.5	0.31	0.31	0.20
СК	34	2.5	3.5	2.8	2.8	1.5	0.22	0.22	0.30

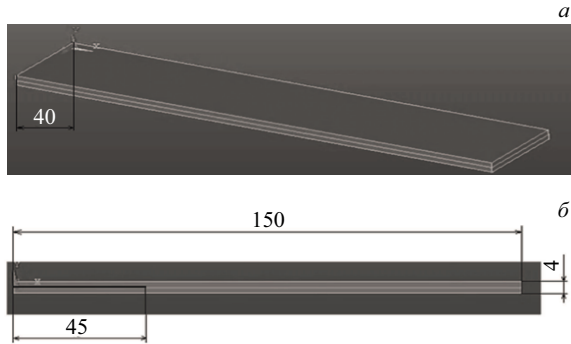


Рис. 2: Общий вид в изометрии (а) и в профиль (б) 3D модели ДКБ с основными размерами модели и заданной начальной длиной трещины

роста трещины в координатах прилагаемая нагрузка P — глобальное раскрытие трещины Δ . Для получения достоверных численных результатов расчета напряжений в КЗ пространственная дискретизация (сетка ИЭ) в этой зоне должна быть достаточно мелкой, чтобы по длине КЗ располагались требуемое число ИЭ. С другой стороны, мелкая сетка приводит к резкому увеличению объема вычислений и, соответственно, требуемых вычислительных мощностей. Оптимизация сетки должна базироваться на точном знании реальной длины физической КЗ и располагаемого в КЗ минимального числа ИЭ, необходимого для достаточно точных расчетов при допустимой мощности вычислений.

1.3. Экспериментальные исследования

Для обоих типов исследуемых слоистых ПКМ стандартными методами были определены упругие характеристики в различных направлениях по плоскостям (табл. 1).

Для экспериментального определения глобального параметра межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ — интенсивности высвобождения упругой энергии при росте трещины по моде I (G_{IC}) использовали стандартный метод [11] и образцы в форме ДКБ, аналогичные по форме и размерам образцам в численном моделировании (рис. 2).

Для получения таких образцов прессовали в закрытой прессформе пластины размером $200 \times 180 \times 4$ мм из 14 слоев препрега УК и из 20 слоев тканого полуфаб-

риката СК соответственно, с выдержкой под давлением 2.5 МПа при температуре 390°C (ПЭЭК) и 240°C (ПКА) в течение 5 минут и последующим охлаждением под давлением до комнатной температуры.

Для создания заданной межслоевой трещины в образцах в середине пакета между его слоями (для УК — между 7-м и 8-м слоями, а для СК — между 10-м и 11-м слоями) с торцевой стороны закладывали фторопластовую пленку толщиной 10 мкм и шириной 50 мм. После прессования из пластин вырезали образцы для испытаний размером $150 \times 20 \times 4$ мм и инициировали естественную краевую трещину. С помощью разрывной машины при скорости движения траверсы 1 мм/с раскалывали образцы, записывая диаграмму разрушения нагрузка–перемещение концов (глобальное раскрытие) трещины $P-\Delta$ и в соответствии с ЛУМР рассчитывали G_{IC} по максимальной (критической) нагрузке P_C , начальной длине трещины a_0 и геометрическим размерам (ширине b и половина толщины h) образца:

$$G_{IC} = \frac{12P_C^2 a^2}{Eb^2 h^3}. \quad (5)$$

Для экспериментального определения локальной межслоевой когезионной прочности σ_{IC} слоистых ПКМ использовались пластины размером $80 \times 50 \times 4$ мм, отпрессованные из 14 слоев препрега УК и из 20 слоев тканого полуфабриката СК с прокладкой в середине пакета между его слоями фторопластовой пленки размером 80×50 мм и толщиной 10 мкм с квадратной вырезкой размером 10×10 мм в центре. Из центральной части пластин вырезались образцы размером $70 \times 40 \times 4$ мм. К внешним поверхностям образцов с помощью клея ВК-9 приклеивались алюминиевые накладки для крепления в зажимах разрывной машины, и образцы испытывались на прочность при растяжении. На рис. 3 представлены фотографии общего вида образца для испытания на когезионную прочность (а) и контактных площадок после межслоевого разрыва образцов СК и УК (а и б) соответственно.

После испытаний на разрыв локальная когезионная прочность при нагружении по моде I рассчитывалась по следующей формуле

$$\sigma_{IC} = \frac{P_{max}}{S}, \quad (6)$$

где P_{max} — усилие отрыва локального слоя образца; S — площадь зоны разрушения, м^2 .

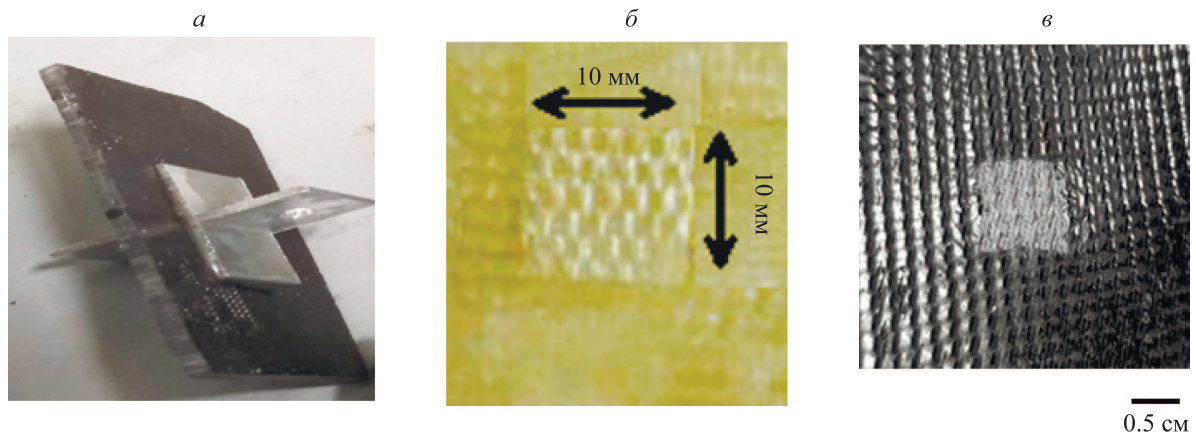


Рис. 3: Фотографии общего вида образца (а) и поверхности слоев образцов после разрыва локальной зоны сцепления в СК (б) и УК (в).

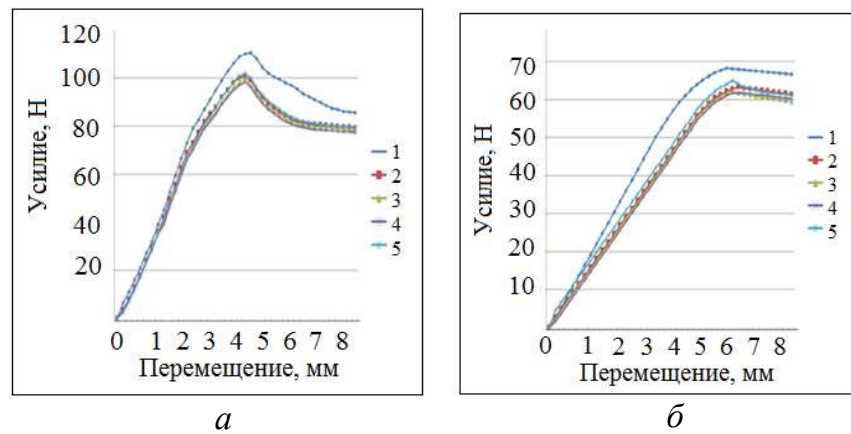


Рис. 4: Экспериментально полученные (кривые 5) и рассчитанные по 3D-числовой модели с использованием различной длины интерфейсных элементов: 0,5 мм (кривые 1); 0,2 мм (кривые 2); 0,1 мм (кривые 3); 0,01 мм (кривые 4) зависимости нагрузки на края трещины от их перемещения при раскрытии трещины в образцах ДКБ из УК (а) и СК (б)

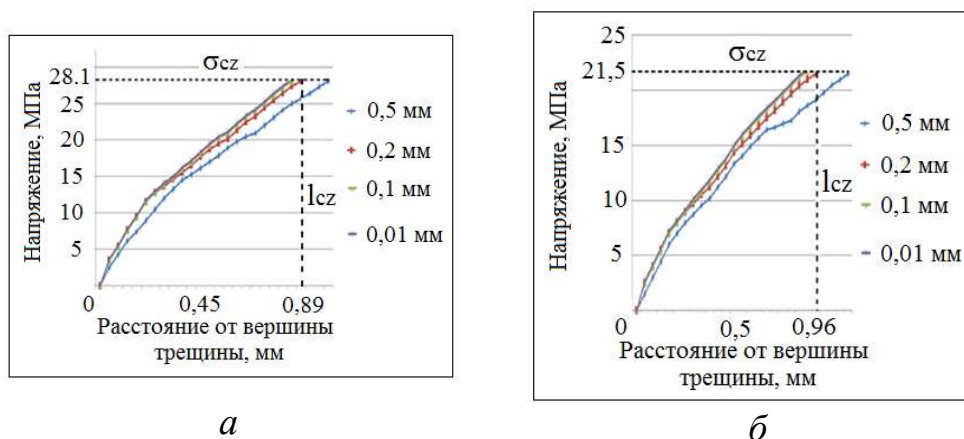


Рис. 5: Распределение напряжений по длине числовой КЗ от вершины трещины при различной длине ИЭ КЗ: (а) — для УК, (б) — для СК

По полученным значениям G_{IC} , σ_{IC} и модуля Юнга E с использованием формулы (1) была рассчитана длина КЗ (l_{K3}). В таблице 2 обобщены экспериментально определенные значения G_{IC} , σ_{IC} и рассчитанная по ним длина когезионной зоны l_{K3} для обоих исследуемых материалов.

Таблица 2: Экспериментально определенные значения G_{IC} и σ_{IC} и рассчитанные значения длины когезионной зоны l_{K3} для УК и СК

ПКМ	G_{IC} , Дж/м ²	σ_{IC} , МПа	l_{K3} , мм
УК	352	28.1	0.89
СК	324	21.5	0.96

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 обобщены экспериментально полученные и рассчитанные по числовой 3D-модели с использованием различных размеров когезионных конечных (интерфейсных) элементов зависимости нагрузки на края трещины (P) от их перемещения (глобального раскрытия трещины) (Δ) для образцов ДКБ из УК (а) и СК (б).

На рис. 5 представлены рассчитанные по 3D-модели с использованием аналогичных рис. 4 длин интерфейсных элементов кривые распределения напряжений по длине числовой когезионной зоны от вершины трещины до их пересечения с пунктирной линией экспериментально определенной величины локальной когезионной прочности σ_{IC} для образцов УК (а) и СК (б). Точки пересечения кривых напряжений соответствуют рассчитанным по МКЗ длинам КЗ (l_{K3}).

Сравнение близости расчетных кривых $P - \Delta$ к экспериментально определенным на рис. 4 и полученных

расчетным путем к экспериментально полученным значениям l_{K3} на рис. 5 (0.89 мм для УК и 0.96 — для СК) позволяет оценить точность вычислений при различных длинах ИЭ. Как видно из этих рисунков, наиболее близкие (на 95%) расчетные и экспериментально полученные данные для обоих типов термопластичных ПКМ даёт использование ИЭ длиной 0.2 мм при их количестве в числовой КЗ, равном 4. При использовании ИЭ длиной менее 0.2 мм резко возрастает их количество в КЗ и, следовательно, объем и длительность вычислений, причем это не приводит к повышению точности моделирования. Данные, полученные с использованием ИЭ длиной более 0.2 мм, существенно превышают экспериментально полученные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты:

1. Конечно-элементная модель когезионной зоны применима к оценке трещиностойкости слоистых армированных ПКМ на основе угле- и стеклотканей и псевдохрупких термопластичных матриц — полиэфирэфиркетона и поликапроамида. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментов.
2. При использовании характерной длины когезионной зоны (l_{K3}), определенной по экспериментально полученным значениям глобального (G_{IC}) и локального (σ_{IC}) параметров трещиностойкости исследованных слоистых ПКМ установлены количество (4) интерфейсных элементов по длине когезионной зоны и их оптимальная длина (0.9 мм), обеспечивающие низкую погрешность расчета диаграмм роста трещины в координатах нагрузка на края трещины и ее раскрытие (не выше 5%) при допустимом объеме вычислений.

[1] Бабаевский П. Г., Кулик С. Г. Трещиностойкость отвержденных полимерных композиций. М.: «Химия» 1991.
 [2] Sridharan Ed. // Delamination behavior of composites. 1st Edition. CRC. Woodhead Publishing, 2008.
 [3] Hillerborg A., Modéer M., Petersson P. // *Cement and Concrete Research*. 1976. **6**, N 6. P. 773.
 [4] Turon A., Davila C. G., Camanho P. P. Effective Simulation of Delamination in Aeronautical Structures Using Shells and Cohesive Elements *Journal of Aircraft*. 2008. **45**. P. 663.
 [5] Harper P., Hallett S. R. // *Engineering Fracture Mechanics*, 2008. **75**, N 16. P. 4774.
 [6] Xu X., Needleman A. // *J. Mechanics and Physics of*

Solids. 1994. **42**. P. 1397.
 [7] Moslemi M., Khoshrovan M. // *Journal of Mechanical Engineering*. 2015. **61**. P. 507.
 [8] Бабаевский П. Г., Салиенко Н. В., Новиков Г. В. // Журнал «Перспективные материалы». 2019. **3**. С. 74.
 [9] Баренблатт Г. И. // Журнал прикладной механики и теоретической физики. 1961. № 4. С. 3.
 [10] Dugdale D. S. // *J. Mech. and Phys. Solids*. 1960. **8**, N 2. P. 100.
 [11] Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites; ASTM D5528-13; 2013.

Numerical evaluation of the resistance to interlayer crack growth for reinforced thermoplastic polymeric composite materials using the experimentally determined parameters of the cohesive zone

G. V. Novikov^a, P. G. Babaevsky^b, N. V. Salienko^c

¹Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI), Institute № 11,
Department of Technology of Composite Materials, Structures and Microsystems
Moscow, 121552, Russia

E-mail: ^angv92@mail.ru, ^bbabaevskiyg@mati.ru, ^cintdep@mati.ru

It is shown that the finite-element 3D model of the cohesive zone developed in the ANSYS® software for the sample in the form of DCB, delaminated according to mode I, is applicable for evaluation of crack resistance of layered reinforced polymer composite materials that are perspective for use in aerospace engineering. The results of numerical modeling correlate well with experimentally obtained data. Using in the model for two different in structure and composition reinforced polymer composite laminates based on carbon and glass fibers and pseudo-brittle thermoplastic matrices — polyetheretherketone and polycapraamide, the length of the cohesive zone, calculated according to experimentally determined parameters of interlayer crack resistance (intensity of elastic energy release during crack growth and local cohesive strength of the material), the minimum required size and number of interface (cohesive) elements were selected that provide a sufficiently high accuracy in the calculation of the main crack resistance parameters, while minimizing amount of computations.

PACS: 89.20.rg

Keywords: double cantilever beam (DCB), polymer composite material (PCM), carbon composite (CC), glass composite (GC), polyetheretherketone (PEEK), polycapraamide (PCA), linear-elastic fracture mechanics (LEFM), cohesive zone model (CZM), traction-separation law (TSL), the finite element method (FEM), the interface element (IE).

Received 25 February 2020.

Сведения об авторах

1. Новиков Геннадий Витальевич — преподаватель-исследователь; e-mail: ngv92@mail.ru.
2. Бабаевский Петр Гордеевич — доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; тел.: (499) 141-94-24, e-mail: babaevskiyg@mati.ru.
3. Салиенко Николай Викторович — канд. техн. наук, доцент; тел.: (499) 141-94-24, e-mail: intdep@mati.ru.