

Экспериментальная оценка адекватности численного моделирования межслоевой трещиностойкости слоистого стеклоэпоксикомпозита при комбинированной моде нагружения I/II

П. Г. Бабаевский, Н. В. Салиенко, А. А. Шаталин

Проведена оценка достоверности численного моделирования роста трещин в слоистом стеклоэпоксикомпозите при комбинированном нагружении раскрытием (мода I) и сдвигом (мода II) межслоевой трещины. По экспериментально определенным стандартными (методами двойной консольной балки (double cantilever beam (DCB)) и 3-х точечным изгибом (метод изгиба балки с концевым надрезом (end notched flexure (ENF)) и нестандартными (изгиб балки с одной ножкой (single-leg bending (SLB)) и изгиб балки над ножкой (over-leg bending (OLB))) методами значениям параметров межслоевой трещиностойкости при индивидуальных и комбинированных модах нагружения I и II рассчитан показатель степени в уравнении Бензегга – Кенана как материальная константа слоистого эпоксистерексикомпозита. С использованием этого параметра и с помощью пакета прикладных программ “ANSYS” в рамках линейной упругой механики разрушения и метода виртуального закрытия трещины проведено численное конечно-элементное моделирование межслоевой трещиностойкости образцов типа SLB и OLB при комбинированной моде нагружения с различной долей мод. При оптимальном числе элементов в конечно-элементной сетке, подходящих на заданную длину траектории роста трещины, численное моделирование обеспечивает достаточную точность расчетов предельной нагрузки начала роста трещины при минимальном объеме вычислений и хорошее соответствие экспериментально определенных и рассчитываемых параметров трещиностойкости.

Ключевые слова: стеклоэпоксикомпозит, межслоевая трещиностойкость, экспериментальные методы, комбинированные моды нагружения, обобщенный критерий разрушения Бензегга-Кенана, численное моделирование, метод конечных элементов (КЭ), метод виртуального закрытия трещины.

DOI: 10.30791/1028-978X-2023-12-77-84

Введение

При производстве и эксплуатации элементы конструкций из слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ), в том числе стеклоэпоксикомпозитов (СКМ), наиболее часто подвергаются изгибающим и растягивающим нагрузкам, которые создают индивидуальные или комбинированные напряжения отрыва и сдвига композитных слоев — моды нагружения I и II соответственно. Эти напряжения вызывают возникновение и рост трещин между слоями с нарушением структурной целостности конструкций. Чаще всего это проис-

ходит из-за геометрических и материальных неоднородностей, таких как обрывы слоев, изогнутые и скошенные углы, при взаимодействии обшивки и элементов жесткости в сложных конструкциях.

Поскольку такие расслоения трудно контролировать, предотвращение их возникновения и распространения является наиболее эффективным способом обеспечения несущей способности слоистых ПКМ. Поэтому при проектировании и расчете на прочность и несущую способность элементов конструкций из многослойных ПКМ, а также при их эксплуатации важнейшее значение имеют надежные, экспериментально определенные кри-

теории устойчивости к инициированию и росту межслоевых трещин (межслоевой трещиностойкости) при комбинированных режимах нагружения (трещинодвижущих силах) с различным соотношением основных мод нагружения — межслоевом отрыве (мода I) и сдвиге (мода II). Применительно к индивидуальным модам межслоевого нагружения слоистых ПКМ в рамках линейной упругой механики разрушения (ЛУМР) разработаны стандартные методы оценки параметров трещиностойкости слоистых ПКМ (G_{IC} и G_{IIC}) с использованием простых образцов в виде пластин с заданной межслоевой краевой трещиной [2 – 5] с раскрытием трещины растяжением (метод двойной консольной балки, double cantilever beam (DCB)) [3] и 3-х точечным изгибом (метод изгиба балки с концевым надрезом (end notched flexure (ENF)) соответственно [4].

Для комбинированного режима межслоевого нагружения слоистых ПКМ (смешанной моды I/II) такие методы активно разрабатываются с использованием обобщенного критерия трещиностойкости ($G_{I/II}$), учитывающего вклады различных мод нагружения. Для определения такого критерия используются различные эмпирические соотношения, в частности, уравнение (критерий) Бензеге – Кенана (Б – К) [1]:

$$G_{I/II} = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} \right)^\eta, \quad (1)$$

где G_{IC} и G_{IIC} — параметры межслоевой трещиностойкости при нагружении по индивидуальным модам I и II соответственно; G_I и G_{II} — вклады отдельных мод при комбинированном нагружении.

В этом уравнении отношение $\frac{G_{II}}{G_I + G_{II}}$ соответствует доле моды нагружения II при комбинированном нагружении I/II, а показатель степени η является материальной константой. Рост трещины происходит тогда, когда комбинированная нагрузка на трещину ($G_I + G_{II}$) достигнет или превысит $G_{I/II}$.

Для экспериментального определения критерия межслоевой трещиностойкости при комбинированном нагружении разработан метод с использованием образцов типа DCB/ENF с краевой межслоевой трещиной, подвергаемых одновременно изгибу, обеспечивающему моду II, и раскрытию трещины, обеспечивающему моду I, с помощью рычагов с регулируемой длиной плеч (метод изгиба балки по смешанной моде (mixed-mode bending (MMB)) [5]. Этот метод требует сложной оснастки, поэтому в последнее время интенсивно исследуется 3-х опорный изгиб простых асимметричных

образцов типа DCB/ENF с укороченным нижним концом трещины. При приложении изгибающей нагрузки в центре образца на удалении от начальной трещины метод называется изгибом с одной ножкой (single leg bending (SLB)) [8], а при приложении изгибающей нагрузки сверху над трещиной — изгибом над ножкой (изгиб балки над ножкой (over-leg bending (OLB)) [9]. Изменения длины начальной трещины и места приложения нагрузки позволяют варьировать вклады различных мод в нагружении трещины.

Определяемые экспериментально параметры и критерии трещиностойкости при индивидуальных и комбинированных модах нагружения предназначены для оценки и прогнозирования несущей способности и эксплуатационной надежности конкретных элементов конструкций из слоистых стеклокомпозитов. В настоящее время эти задачи решаются преимущественно численными методами с использованием пакетов прикладных программ. Это, в свою очередь, требует проверки адекватности моделирования межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ с помощью имеющихся программных продуктов. Для индивидуальных мод нагружения такой подход проверен практически для всех типов слоистых ПКМ с использованием в пакетах программ ABAQUS и ANSYS метода конечных элементов (МКЭ) и двух основных моделей: виртуального закрытия трещины (virtual crack closure technique (VCCT)) и когезионной зоны (cohesive zone model (CZM)) [8, 9].

Цель данной работы — определение достоверности численного моделирования роста трещин в двух образцах слоистого стеклокомпозита типа SLB и OLB методом виртуального закрытия трещины в среде пакета прикладных программ ANSYS с использованием экспериментально определенного критерия межслоевой трещиностойкости при комбинированном нагружении по модам I/II.

Экспериментальное определение критерия межслоевого разрушения стеклоэпоксикомпозита

Для экспериментальной оценки критерия межслоевого роста трещины Бензеге-Кенана в слоистом ортотропном стеклоэпоксикомпозите (СКМ) при комбинированном нагружении I/II (уравнение (1)) G_{IC} и G_{IIC} при индивидуальных модах нагружения определяли с использованием образцов в виде DCB [3] и ENF [4], а при комбинированном режиме с различным вкладом мод — SLB [6] и OLB [7]. Образцы для испытаний в виде полосок длиной

Упругие константы слоистого стеклоэпоксикомпозита

Table 1

Elastic constants of the glass-epoxy laminate composite

Модули Юнга, E , ГПа			Модули сдвига, G , ГПа			Коэффициенты Пуассона, ν		
E_{11}	E_{22}	E_{33}	G_{11}	G_{12}	G_{13}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
20,00	18,00	3,50	4,2	4,2	3,18	0,24	0,24	0,45

$L = 150$ мм, шириной $b = 20$ мм и полутолщиной $h = 2$ мм с предварительно заданной межслоевой трещиной вырезали из тонких пластин СКМ, полученных методом вакуумного формования препрега КМКС на основе стеклоткани Т-10 и клеевого связующего ВСК-14-2м. Для задания начальных трещин использовали фторопластовую пленку, прокладывая ее между слоями в заданном месте и на заданную ширину.

При формовании пластины проводили сборку двух технологических пакетов из 10 слоев препрега в каждом, между которыми закладывали фторопластовую пленку толщиной 10 мкм, обеспечивающую заданную длину начальной трещины в вырезаемых из пластин образцах. Формование пластин осуществляли в вакуумном термощкафу

при остаточном давлении не более $0,8$ кгс/см², нагреваемом до температуры 125 ± 5 °С со скоростью не более 2 °С/мин, и выдержкой технологического пакета при этой температуре и давлении в течение 60 мин. Далее температуру увеличивали до 180 ± 5 °С, и пластину выдерживали при этой температуре в течение 5 ч, затем охлаждали до комнатной температуры со скоростью не более 1 °С/мин.

Предварительно определенные стандартными методами упругие константы исследуемых пластин СКМ, необходимые при последующих расчетах, обобщены в табл. 1.

Для испытаний на трещиностойкость из отформованных пластин вырезали образцы типа DCB, ENF, SLB и OLB, представленные на рис. 1.

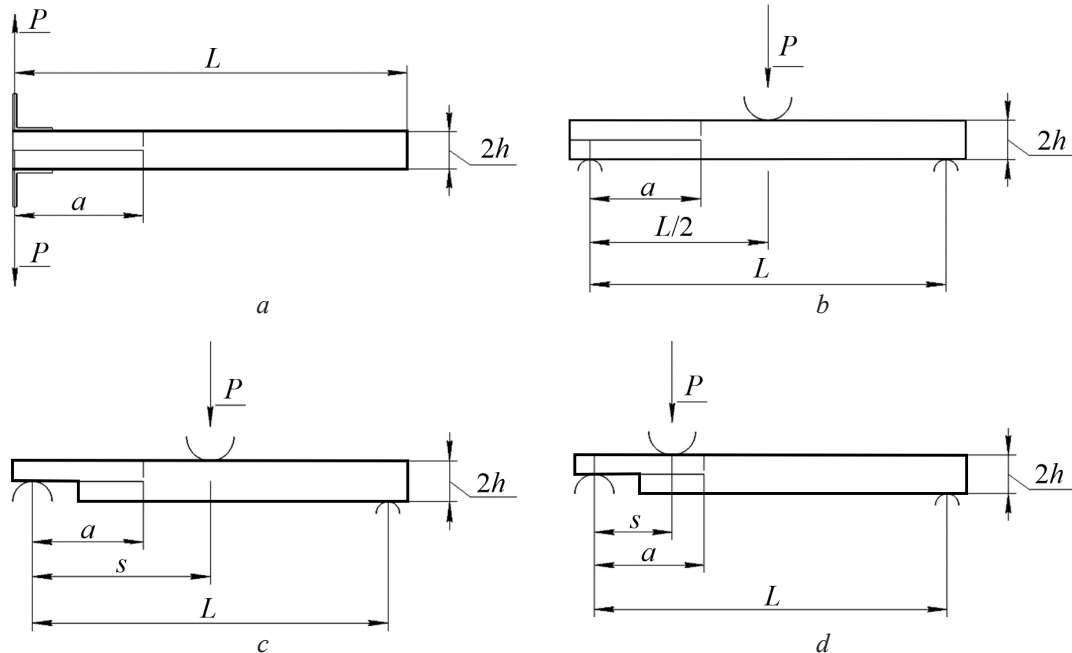


Рис. 1. Образцы для испытаний типа DCB (a), ENF (b), SLB (c) и OLB (d): a — длина начальной трещины, $2h$ — общая толщины образца (4 мм), L — общая длина образца (150 мм), s — расстояние от края до точки приложения нагрузки на образец типа OLB, P — приложенная нагрузка.

Fig. 1. DCB (a), ENF (b), SLB (c) and OLB (d) test specimens: a — initial crack length, $2h$ — total specimen thickness (4 mm), L — total specimen length (150 mm), s — the distance from the edge to the point of the load applied on the OLB specimen, P — the applied load.

Обобщенные параметры трещинодвижущих сил и трещиностойкости образцов SLB и OLB стеклоэпоксикомпозита

Table 2

Generalized crack driving forces and fracture toughness parameters of the glass epoxy composite specimens SLB and OLB

Образец	Длина начальной трещины, a , м	Предельная нагрузка при изгибе, P_C , Н	Значения G , Дж/м ²		$G_C = G_I + G_{II}$, Дж/м ²	Доля сдвиговой моды $\phi = \frac{G_{II}}{G_I + G_{II}}$
			G_I	G_{II}		
SLB	0,043	113,5	317,3	214,9	532,2	0,39
	0,066	75,5	316,6	222,0	538,6	0,41
OLB	0,043	171,5	259,9	311,5	571,4	0,54
	0,066	218,5	263,7	312,5	576,2	0,56

Для определения G_{IC} образцы типа DCB раскалывали растяжением за края трещины с фиксацией ее глобального раскрытия Δ и изменением длины. Для определения G_{IIC} , а также индивидуальных трещинодвижущих сил G_I и G_{II} и их суммы при комбинированных модах образцы типа ENF, SLB и OLB подвергали 3-х точечному изгибу, фиксируя прогиб балки и изменение длины трещины.

Испытание образцов проводили на универсальной электромеханической системе WDW-10E при скорости перемещения траверсы 1 мм/с и точности измерения нагрузки 0,4 % от измеряемой величины. Для измерения раскрытия трещины и прогиба образцов применяли датчик перемещения, обеспечивающий измерение деформации с точностью ± 1 % от базы датчика деформации. Для контроля начала роста трещины на одну из боковых кромок образца наносили тонкий слой белой хрупкой краски на водной основе и наблюдали за кончиком трещины с помощью катетометра.

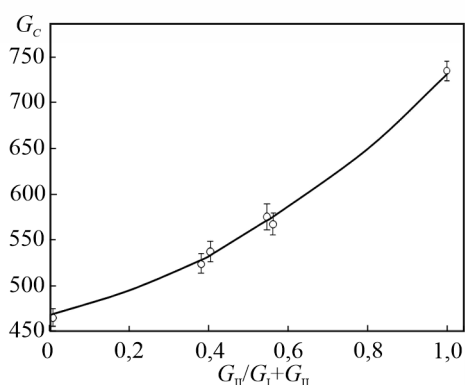


Рис. 2. Зависимость параметра трещиностойкости G_C от вклада моды II при комбинированном нагружении (критерий Бензегга – Кенана).

Fig. 2. Dependence of the fracture toughness parameter G_C on the contribution of mode II under mixed-mode loading (Benzeggagh – Kenane fracture criterion).

Испытывали по 5 образцов. При испытании использовали автоматическую систему записи, регистрируя нагрузку и смещение. Во всех случаях наблюдали хорошую воспроизводимость результатов.

Значения параметров трещиностойкости СКМ, соответствующие индивидуальным модам нагружения (G_{IC} и G_{IIC}) и рассчитанные по стандартным методикам по нагрузке начала роста трещины [3 – 4], равны 468,0 и 732,0 Дж/м² соответственно. Значения отдельных вкладов мод нагружения на трещину для образцов SLB и OLB (G_I^{SLB} , G_{II}^{SLB} и G_I^{OLB} , G_{II}^{OLB}) и их сумму как параметр трещиностойкости также определяли по нагрузке начала роста трещины, используя уравнения, приведенные в [2 – 7]. Полученные при этом данные обобщены в табл. 2.

Обобщенная графическая зависимость параметров трещиностойкости от доли моды II (критерий межслоевого роста трещины) при комбинированном нагружении для стеклоэпоксикомпозита представлена на рис. 2.

По данной зависимости рассчитана константа материала η в уравнении (1) критерия разрушения Бензегга – Кенана [10], значение которой для стеклоэпоксикомпозита равно 1,4.

Конечно-элементное численное моделирование межслоевой трещиностойкости слоистого стеклоэпоксикомпозита при комбинированной моде нагружения I/II

Численное моделирование процесса роста трещины при комбинированном нагружении при изгибе в образцах типа SLB и OLB в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL R23 [11] осуществляли с помощью имплантированных в метод конечных элементов в рамках ЛУМР моделей виртуального закрытия трещины VCCT [12].

В методе VCCT виртуальное расслоение образцов при комбинированном нагружении проводили с помощью 2D-моделей с размерами, соответствующими физическим образцам (рис. 1c, 1d), при заданной длине начальной трещины 66 и 43 мм. Геометрические модели виртуальных образцов содержат плоские конечные элементы Solid 182, доступные в библиотеке конечных элементов программного комплекса. Полубалки геометрических моделей разбивали регулярной сеткой из элементов Solid 182, а также задавали упругие характеристики СКМ, приведенные в табл. 1: модули Юнга, модули сдвига и коэффициенты Пуассона.

Траекторию роста трещины между полубалками моделировали совпадающими узлами с одинаковыми координатами, но принадлежащими разным конечным элементам (двойные узлы) на верхней и нижней поверхностях полубалок. Распространение трещины моделировали для комбинированного режима нагружения с учетом константы материала $\eta = 1,4$ из критерия разрушения Бензегга – Кенана. Интенсивность выделения упругой энергии G_I или G_{II} для соответствующей моды нагружения, вычислили из узловых сил и перемещений, полученных в процессе конечно-элементного моделирования [13].

Выбор оптимальных размеров конечно-элементной сетки, то есть длины КЭ, обеспечивающей достаточную точность численных расчетов условий роста трещины при минимальной трудоемкости вычислений, осуществлялся методом подбора. Для исследований выбрали длины КЭ, равные 2 мм, 1 мм, 0,5 мм и 0,1 мм. Выбор этого набора длин КЭ обусловлен успешным его применением при моделировании трещиностойкости слоистых ПКМ по индивидуальным модам I и II для образцов DCB и ENF [14].

После задания числа КЭ выбранной длины прикладывается нагрузка, ограничиваются степени свободы по границам модели и настраиваются параметры расчета в процессоре программы. При моделировании происходит виртуальный рост трещины, результаты расчетов анализируются в постпроцессоре программного комплекса и автоматически выводятся в виде визуальных изображений распределения напряжений в процессе роста трещины при виртуальном расслоении образцов SLB и OLB и графических зависимостей глобальной нагрузки на трещину от величины прогиба образца при различной длине начальной трещины.

На рис. 3 приведены примеры визуальных изображений характера распределения напряжений по длине цифровой трещины для образцов типа SLB

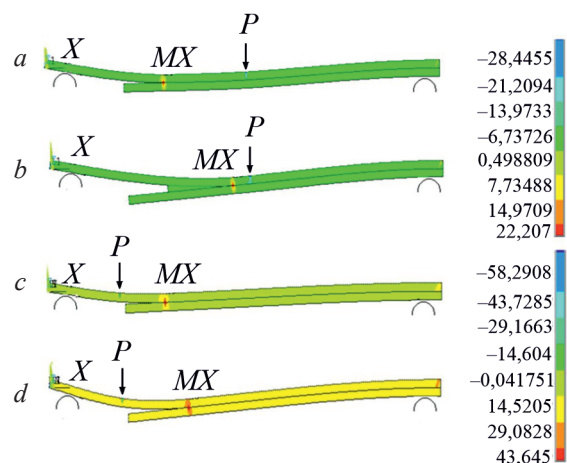


Рис. 3. Примеры распределения напряжений при развитии цифровой трещины в образцах типа SLB (a, b) и OLB (c, d) при заданной длине КЭ 1 мм, длине начальной трещины 43 мм и величинах прогиба $\delta = 7,8$ мм (a, c) и $\delta = 12,5$ мм (b, d).

Fig. 3. Examples of stress distribution during the development of a digital crack in SLB (a, b) and OLB (c, d) specimens with a given FE length of 1 mm, an initial crack length of 43 mm and displacement values $\delta = 7.8$ mm (a, c) and $\delta = 12.5$ mm (b, d).

(a, b) и OLB (c, d) при различном прогибе, заданной длине КЭ и длине начальной трещины.

Из этих данных следует, что при изгибе образцов типа OLB вблизи вершины трещины развиваются значительно большие напряжения, чем образцов типа SLB, а приращение длины трещины после начала ее прорастания, наоборот, значительно больше для SLB, чем OLB при одинаковой начальной длине трещины и одинаковом прогибе.

На рис. 4 приведены рассчитанные численным моделированием графики нагрузка – прогиб при различной длине КЭ и экспериментально полученные при испытаниях образцов SLB (a, b) и OLB (c, d) с различной длиной начальной трещины.

Приведенные на рис. 4 графики свидетельствуют об адекватности по форме кривых, полученных численным моделированием и экспериментально. В обоих случаях начало роста трещины четко проявляется в изменении характера кривых: уменьшением скачка нагрузки (в случае SLB) и уменьшением ее наклона (в случае OLB) в критической точке.

На рис. 5 проведено сравнение расчетных и экспериментально полученных данных о прорастании трещины в зависимости от прогиба образца после достижения критической нагрузки. Максимальное расхождение экспериментально полученных зна-

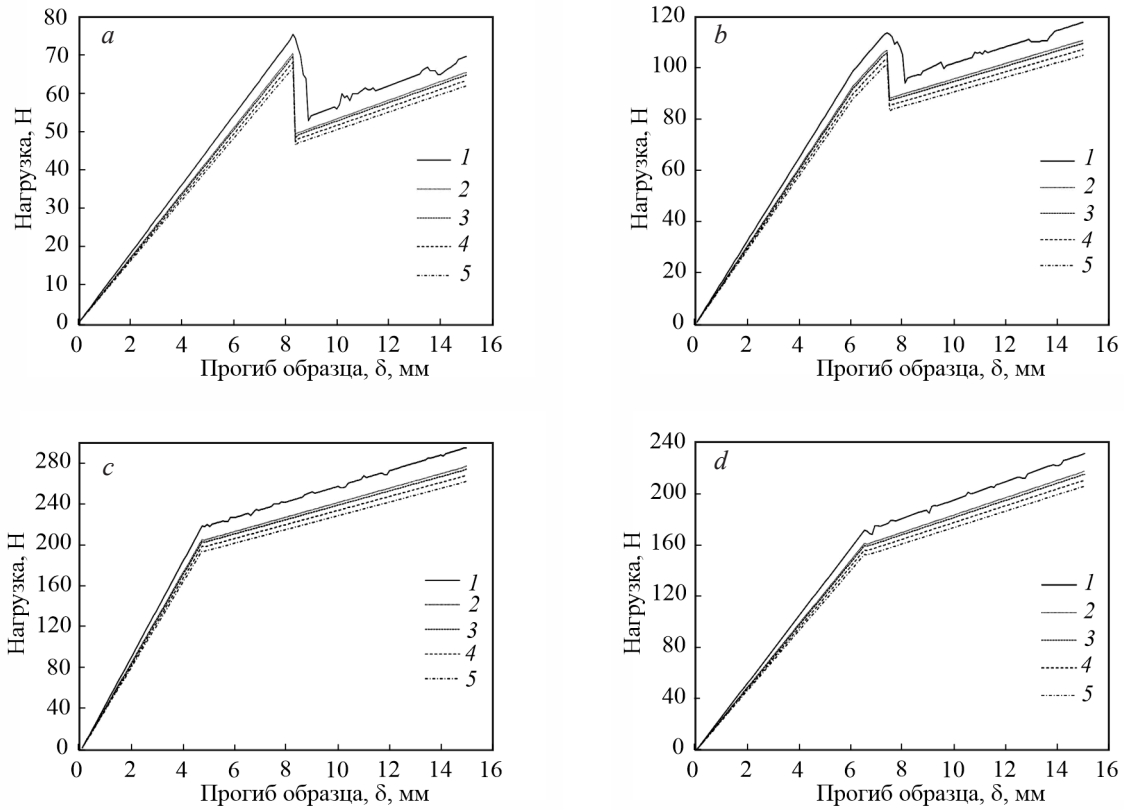


Рис. 4. Расчетные (при различной длине КЭ, мм: 2 — 0,1, 3 — 0,5, 4 — 1, 5 — 2) и экспериментально (1) полученные графики нагрузка – прогиб для образцов стеклоэпоксикомпозита типа SLB (a, b) и OLB (c, d) при длинах начальной трещины 66 мм (a, c) и 43 мм (b, d).

Fig. 4. Calculated (with different length of FE, mm: 2 — 0.1, 3 — 0.5, 4 — 1, 5 — 2) and experimentally obtained load-displacement graphs of the glass-epoxy laminate composite for SLB (a, b) and OLB (c, d) type specimens with initial crack lengths of 66 mm (a, c) and 43 mm (b, d).

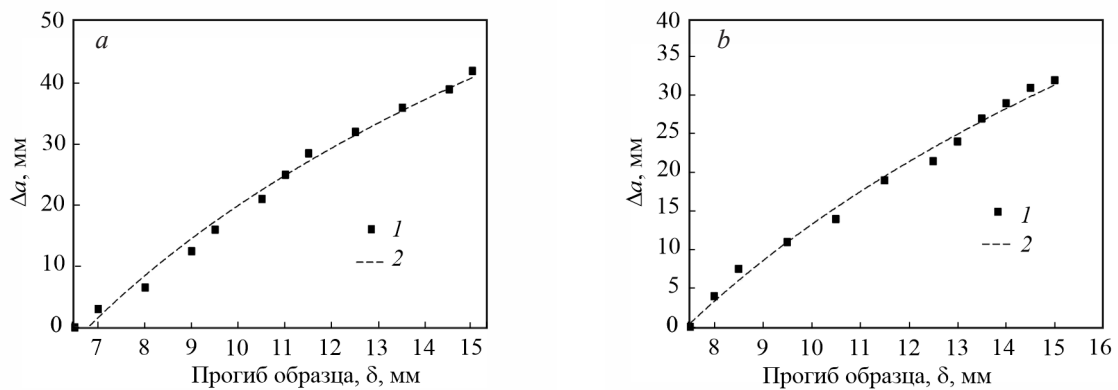


Рис. 5. Экспериментально (1) и численно (2) полученные зависимости увеличения длины трещины (Δa) от прогиба образцов (δ) SLB (a) и OLB (b) при длине начальной трещины 43 мм.

Fig. 5. Experimentally (1) and numerically (2) obtained dependences of the increase in crack length (Δa) on the displacement of specimens (δ) SLB (a) and OLB (b) with an initial crack length of 43 mm.

чений приращения длины трещины с расчетными для образцов SLB и OLB составляет 4,6 %, и 5,8 % соответственно, что также подтверждает адекватность моделирования.

Во всех случаях с уменьшением размера КЭ и, соответственно, с увеличением их количества точность моделирования возрастает. Так, при длине КЭ, равной 2 мм, расхождения с экспериментальными данными для образцов стеклоэпоксикомпозита типа SLB составляет 15,5 % и 14,2 % и для образцов типа OLB — 17,4 % и 13,4 %, при длине начальной трещины 66 мм и 43 мм соответственно. Применение КЭ длиной 1 мм значительно снижает погрешность численных расчетов. В этом случае диапазон расхождений с экспериментально полученной зависимостью для двух типов исследуемых образцов с начальными трещинами 66 и 43 мм составляет 5 – 6,3 %, что является достаточной точностью для большинства практических применений. Дальнейшее уменьшение длины КЭ снижает расхождение всего на 1 – 1,5 % при значительном увеличении трудоемкости вычислений.

Выводы

Полученные в работе на примере стеклоэпоксикомпозита результаты и их анализ показывают, что численное моделирование межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ при комбинированной моде нагружения простых образцов типа SLB и OLB при различном соотношении мод нагружения II/I хорошо согласуется с экспериментально полученными данными.

Численное моделирование методом конечных элементов с использованием модели виртуального закрытия трещины и экспериментально определенных на простых образцах параметров трещиностойкости и критерия роста трещин при комбинированном нагружении даёт достоверные результаты и может применяться на практике для численного анализа межслоевой трещиностойкости отдельных элементов, сложных агрегатов и в целом конструкций из слоистых ПКМ.

Литература/References

1. Benzeggagh M., Kenane M. Measurement of mixed mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed mode bending apparatus. *Composites Science and Technology*, 1996, v. 56, pp. 439 – 449.
2. Яковлев Н.О., Гуляев А.И., Лашов О.А. Трещиностойкость слоистых полимерных композиционных материалов (обзор). Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2016, №4, с. 106–114. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.10.2022).
3. Yakovlev N.O., Gulyaev A.I., Lashov O.A. Treshchinostojkost' sloistyh polimernyh kompozicionnyh materialov (obzor) [Crack resistance of layered polymer composite materials (review)]. *Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhnich. zhurn. [Proceedings of VIAM: electron. scientific and technical journal]*, 2016, no. 4, pp.106 – 114. URL: <http://www.viam-works.ru> (date of application:05.10.2022). (In Russ.).
4. Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. Designation: D 5528-13, ASTM International West Conshohocken, PA, 2016.
5. Standard test method for determination of the mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites: D 7905/D 7905M-14, ASTM International West Conshohocken, PA, 2016.
6. Standard test method for mixed mode I-mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber reinforced polymer matrix composites: D 6671/D 6671M-M22, ASTM International West Conshohocken, PA, 2022.
7. Davidson B.D., Sundararaman V. A single leg bending test for interfacial fracture toughness determination. *International Journal of Fracture*, 1996, v. 78, pp. 193 – 210.
8. Szekrenyes A., Uj J. Over-leg bending test for mixed-mode I/II interlaminar fracture in composite laminates. *Int. J. Damage Mech.*, 2007, v. 16, pp. 5 – 33.
9. Camanho R.R., Davila C.G., de Moura M. Numerical simulation of mixed mode progressive delamination in composite materials. *J. Compos. Mater.*, 2003, v. 37, pp. 1415 – 1438.
10. Turon A., Camanho P.P., Costa J., Renart J. Accurate simulation of delamination growth under mixed-mode loading using cohesive elements: definition of interlaminar strengths and elastic stiffness. *Compos. Struct.*, 2010, v. 92, pp. 1857 – 1864.
11. Sidharth Reddy Karnati, Kunigal Shivakumar. Limited input benzeggagh and kenane delamination failure criterion for mixed-mode loaded fiber reinforced composite laminates. *Int. J. Fract.*, 2020, v. 222, pp. 221 – 230.
12. ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide. Release 15.0, November 2013, pp. 339 – 407.
13. Krueger R. Virtual crack closure technique: History, approach, and applications. *Appl. Mech. Rev.*, 2004, v. 57, no. 2, pp. 109 – 143.
14. Hongsu Bae, Minsong Kang, Kyeongsik Woo, In-Gul Kim, Kyung-hwan In. Test and analysis of modes I, II and mixed-mode I/II delamination for carbon/epoxy composite laminates. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2019, v. 20, pp. 636 – 652.
15. Бабаевский П.Г., Салиенко Н.В., Новиков Г.В. Использование экспериментально определенных

параметров когезионной зоны при численной оценке устойчивости к расслоению полимерных композитов. Перспективные материалы, 2019, №3, с. 74 – 81.

- Babayevsky P.G., Salienko N.V., Novikov G.V. Use of experimentally determined parameters of the cohesive

zone in the numerical evaluation of the resistance to delamination of polymer composites materials. Inorganic Materials: Applied Research, 2019, v. 10, no. 5, pp. 1259 – 1264.

*Статья поступила в редакцию — 30.05.2023 г.
после доработки — 29.06.2023 г.
принята к публикации — 08.07.2023 г.*

Бабаевский Петр Гордеевич — Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет (121552, Москва, ул. Оршанская, 3), доктор технических наук, профессор, и.о. заведующего кафедрой Технологии композиционных материалов, конструкций и микросистем, специалист в области материаловедения и технологий полимерных композиционных материалов. E-mail: pgbabayevs@mail.ru.

Салиенко Николай Викторович — Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет (121552, Москва, ул. Оршанская, 3), кандидат технических наук, доцент, специалист в области материаловедения и технологий полимерных композиционных материалов. E-mail: salienkonv@mail.ru.

Шаталин Александр Андреевич — Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет (121552, Москва, ул. Оршанская, 3), ассистент кафедры Технологии композиционных материалов, конструкций и микросистем, специалист в области материаловедения и технологий полимерных композиционных материалов. E-mail: aashatalin@yandex.ru.

Experimental evaluation of the numerical simulation adequacy for a laminate glass-epoxy composite interlayer crack resistance under mixed mode I/II loading

P. G. Babaevskiy, N. V. Salienko, A. A. Shatalin

The reliability of numerical simulation of crack growth in a laminate glass-epoxy composite under mixed-mode loading by opening (mode I) and shear (mode II) of an interlayer crack is verified. According to the experimentally determined standard (DCB and ENF) and nonstandard (SLB and OLB) methods, the values of the parameters of interlayer crack resistance under individual and mixed-mode loading modes I and II calculated the exponent in the Benzeggagh-Kenane equation as a material constant of the laminate epoxy glass composite. Using this parameter and the ANSYS software package, within the framework of linear elastic fracture mechanics and the method of virtual crack closure, numerical finite element modeling of the growth of interlayer cracks in samples of a laminate glass-epoxy composite of the SLB and OLB types was carried out under a mixed-mode loading with a different fraction of modes. With the optimal number of elements in the finite element mesh per given length of the crack growth trajectory, numerical simulation provides sufficient accuracy of calculations of the limit load of the beginning of crack growth with a minimum amount of calculations and good agreement between the experimentally determined and calculated crack resistance parameters.

Keywords: glass epoxy composite, interlaminar crack resistance, experimental methods, mixed-mode loading, Benzeggagh-Kenane fracture criterion, numerical simulation, finite element method, virtual crack closure technique.

Babayevskiy Petr — Moscow Aviation Institute (National Research University) (Moscow, 121552, ul. Orshanskaya, 3), doctor of technical sciences, professor, acting head of the chair Technologies of composite materials, structures and microsystems, specialist in the field of material science and technology of polymer composites. E-mail: pgbabayevs@mail.ru.

Salienko Nikolay — Moscow Aviation Institute (National Research University) (Moscow, 121552, ul. Orshanskaya, 3) PhD, associate professor, Technologies of composite materials, structures and microsystems, specialist in the field of material science and technology of polymer composites. E-mail: salienkonv@mail.ru.

Shatalin Aleksandr — Moscow Aviation Institute (National Research University) (Moscow, 121552, ul. Orshanskaya, 3), assistant of the chair Technologies of composite materials, structures and microsystems, specialist in the field of material science and technology of polymer composites. E-mail: aashatalin@yandex.ru.