

Численное моделирование роста трещины в композиционных материалах*И. В. Девятков, К. Н. Мингалиев, Д. В. Туев, С. А. Юргенсон*

В статье рассмотрена локальная задача определения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции с развитием межслоевого повреждения. Представлен вариант с возможностью применения в системах мониторинга программной реализации математического аппарата для моделирования роста трещины, выявлены эффекты, характеризующие поведение материала. В результате исследования на основе численного моделирования представлено изменение параметра трещиностойкости в зависимости от длины трещины для термопластичного и реактопластичного связующего.

Ключевые слова: системы мониторинга, авиационная техника, композиционные материалы, математическое моделирование, микромеханика, метод конечных элементов, трещиностойкость.

Ссылка: Девятков И. В., Мингалиев К. Н., Туев Д. В., Юргенсон С. А. // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 97.

Reference: I. V. Devyatov, K. N. Mingaliev, D. V. Tuev, and S. A. Iurgenson, Applied Physics, No. 5, 97 (2020).

Введение

В соответствии с возможностями современных информационных технологий становится все более очевидной потребность в переходе от традиционной системы жестко фиксированных периодических регламентных работ к более совершенной системе контроля и управления техническим состоянием воздушного судна (ВС), основанной на постоянном сборе и анализе информации о техническом состоянии [1].

Для программных решений по анализу данных от систем мониторинга технического

состояния (СМТС) в связи со сложным нагружением конструкции необходимо развитие методов конечно-элементного моделирования (КЭМ). В случае с композиционными материалами (КМ), для которых эффект от внедрения СМТС может быть максимальным, характерны внутренние дефекты. Контроль развития внутренних повреждений в КМ требует не только разработки аппаратной базы, но и методов расчетов.

Численное моделирование роста трещины в композиционных материалах

В анализе прочности конструкционных материалов одно из ключевых направлений занимает анализ роста трещин. Наиболее важным вопросом является момент страгивания кончика трещины под действием силовых воздействий. Существуют различные критерияльные параметры, характеризующие состояние трещины: интенсивность напряжений, инвариантные интегралы, величина раскрытия кончика трещины, плотность затрачиваемой энергии на рост трещины.

Девятков Иван Владимирович¹, зав. лаб., к.э.н.
Мингалиев Камиль Нарзаватович², д.э.н., профессор.
Туев Дмитрий Владимирович¹, м.н.с.
Юргенсон Сергей Александрович¹, м.н.с., к.т.н.

¹ МГУ имени М. В. Ломоносова.
Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские Горы, 1, к. 13, 14.
E-mail: devyatov@orpmgu.ru

² Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации.
Россия, 125993, Москва, Ленинградский просп., 49.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2020 г.

© Девятков И. В., Мингалиев К. Н., Туев Д. В., Юргенсон С. А., 2020

Анализ уровня напряжений в конструкции для страгивания трещины и детальный анализ ее дальнейшего развития позволяет установить критерии для работы СМТС и должны использоваться при выборе типов и размещении датчиков системы.

Выбор в качестве основных моделей межслоевого разрушения связан с тем, что данный дефект является наиболее критичным для конструкций и КМ. Межслоевое разрушение возникает в следствии различных факторов: внешнее воздействие, деградация материала, превышение допустимых нагрузок, производственные дефекты. Данный вид дефекта охватывает все этапы эксплуатации конструкции и необходим при анализе данных СМТС.

Исследование расслоения КМ привлекает значительное внимание исследователей в инженерной и теоретических областях. В качестве примеров можно привести исследования и стандартизация методов для характеристики моды I (отрыв), моды II (сдвиг) и комбинации I – II при расслоении [2–6].

При работе со слоистыми КМ довольно большое распространение получили методы исследования состояния трещин при помощи энергетических параметров. Параметры G_1 , G_2 , G_3 , вводятся как отношения приращения энергии внешних сил к приращению площади трещины, для соответствующего типа нагружения.

Современный мировой уровень разработок в области математического моделирования и исследования свойств материала демонстрирует, что на текущем этапе возможен маневр сокращения натуральных испытаний в пользу проведения вычислительных экспериментов на основе КЭМ.

В данной работе представлены результаты изысканий в области математического моделирования роста трещины в КМ на примере материала полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) с волокнами AS4 для демонстрации изменения параметра трещиностойкости в зависимости от длины трещины.

Демонстрируемый подход моделирования включает в себя метод VCCT (Virtual Crack Closure Technique, методика виртуального закрытия трещины), который анализирует инициацию и рост расслоения между двумя априори заданными поверхностями, когда ис-

ходный фронт расслоения также задается заранее [7]. Краткое описание модели представлено далее.

Критерий пластичности материала, зависящий от вида НДС, имеет общее представление:

$$f(\xi)\sigma_0 = k_0, \quad (1)$$

где k_0 – константа материала, выбираемая по аналогии с пределом текучести в условии пластичности по Мизесу ($f(\xi) \equiv 1$). Чтобы оценить применимость этого критерия для ПЭЭК и получить соответствующие свойства материала, использованы прочностные характеристики ПЭЭК с волокнами AS4 [8] (таблица 1, 2). Поскольку пластичность предшествует разрушению, то значение критерия пластичности должно быть ниже экспериментальных пределов прочности. Начальный предел текучести выбран на 20% ниже предела прочности. Обратное значение интенсивности напряжений $1/\sigma_0$ предела текучести уменьшается с уменьшением параметра трехосности. Линейная зависимость от параметра трехосности использована в качестве первого приближения для описания этого эффекта с обратной зависимостью:

$$f(\xi) = 1 + C\xi, \quad (2)$$

где C – постоянная материала. Критерий пластичности зависит от двух постоянных, поэтому требуется провести только два эксперимента с различными НДС. На практике достаточно получить пределы пластичности для одноосного растяжения и сжатия. Аналогией линейной зависимости (2) является закон Друкера–Прагера, в котором C эквивалентно $\tan(\Psi)$, а (Ψ) – угол внутреннего трения (или угол дилатации) материала.

Следующим этапом моделирования пластичности является выбор закона упрочнения, который должен влиять на предел текучести k_0 . Критерий пластичности при упрочнении можно записать следующим образом:

$$(1 + C\xi)\sigma_0 = k(\varepsilon_{eq}^{pl}), \quad (3)$$

где ε_{eq}^{pl} эквивалентные пластические деформации, которые могут быть представлены в форме

$$\varepsilon_{eq}^{pl} = \int \frac{\sigma_{ij} d\varepsilon_{eq}^{pl}}{\sigma_i^{pl}},$$

где σ_i^{pl} – напряжение растяжения, взятое из кривой одноосного растяжения [8]. Имея модель пластичности материала, далее следует определить критерий накопления повреждений и разрушения. Естественно предположить, что для НДС сжатия пластические деформации до разрушения больше, чем при растяжении. Таким образом, необходим критерий разрушения, у которого накопление повреждений при сжатии меньше, чем в случае растяжения при одинаковых деформациях. В данной работе был использован следующий критерий:

$$D^{pl} = \int \frac{d\varepsilon_{eq}^{pl}}{\varepsilon_D^{pl}(\xi)}, \quad (4)$$

где ε_D^{pl} – зависимость, определяемая экспериментально для данного материала и пред-

ставленная как кусочно-линейная функция. $D^{pl} = 1$ – критерий разрушения. Параметр ε_D^{pl} зависит от параметра трехосности. Поэтому модель может быть скорректирована таким образом, чтобы накопить больше повреждений при растягивающей нагрузке и меньше повреждений при сжимающей. Параметр повреждаемости D^{pl} не оказывает никакого влияния на результат моделирования до тех пор, пока не выполнится критерий разрушения $D^{pl} = 1$, а затем жесткость материала принимается равной нулю. Предложенная модель пластичности с линейной зависимостью от критерия разрушения (4) реализована в данной работе в программе для конечно-элементного моделирования.

На рисунке 1 показана блок-схема для расчёта нагрузки страгивания и прорастания при статическом нагружении.

В таблице 1, 2 приведены параметры материала ПЭЭК и механические свойства волокна AS4, данные значения используются при моделировании.



Рис. 1. Блок-схема решения задачи о трещиностойкости.

Таблица 1

Параметры материала ПЭЭК

Константы материала	Упрочнение при растяжении	Деформации разрушения	
E , ГПа	σT , МПа	ξ	ε^{pl}
3,6	77	D	
ν	81	-0,333	1,5
k_0 , МПа	100	0	1
C	101	2	0,7
Угол трения, ψ , °		0,333	
Длина изначального выреза		10 мм	
Толщина изначального пропила		12,5 мкм	
Процентное содержание волокна		56–60 %	
Характерный размер элементов		0,5 мкм	
Диаметр волокна		5 мкм	

Таблица 2

Механические свойства волокна AS4

Продольный модуль волокна	E11f	Па	2,35E+11
	E22f	Па	1,35E+10
Сдвиговой модуль волокна	G12f	Па	2,76E+10
	G13f	Па	2,76E+10
	G23f	Па	6,89E+09
Коэффициент Пуассона волокна	v12f		2,00E-01
	v13f		2,00E-01
	v23f		5,00E-01
Продольный коэффициент теплового расширения волокна	k11f	1/°C	-9,00E-07
	k22f	1/°C	7,20E-06

По результатам моделирования удалось продемонстрировать процесс роста трещины. На рис. 2 показано распределение повреждения по мере изменения длины трещины Δa , на рис. 3 – распределение минимальных главных пластических деформаций.

По результатам исследования представлено изменение параметра трещиностойкости при отрыве G_{IC}^* в зависимости от длины трещины Δa для термопластичного и реактопластичного связующего, полученные на основе численного моделирования.

Наличие информации о деформациях в конструкции с учетом развития трещины при известном НДС позволит проводить детальный анализ данных от СМТС и в перспективе значительно сократить объем инструментального контроля. Также детальный анализ развития повреждения на основе данных от СМТС позволяет снизить требуемые значения дополнительных коэффициентов безопасности, необходимых для КМ.

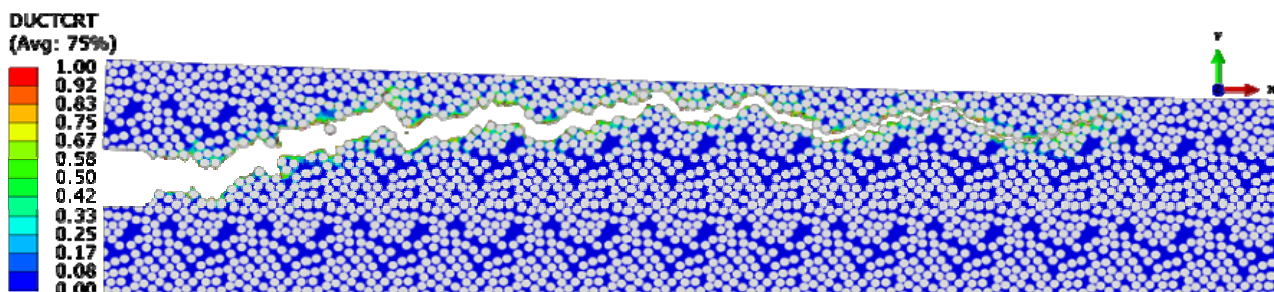


Рис. 2. Повреждение при $\Delta a = 0,581$ мм, (x, y – продольное и поперечное направление в среде моделирования).

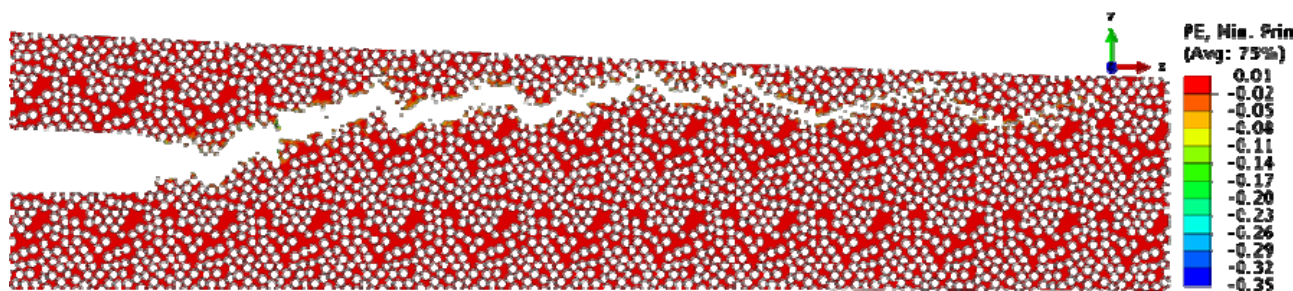


Рис. 3. Распределение минимальных главных пластических деформаций.

* G_{IC} – характеристика трещиностойкости, энергия срагивания при моде I (Дж/м²).

Обсуждение результатов

По результатам моделирования в настоящей статье были даны ответ на вопросы: «Какова сходимость результатов натуральных испытаний и результатов численного моделирования», «Каковы результаты моделирования для нормального отрыва и сдвига?».

На основе полученных результатов (рис. 4), в сравнении с опубликованными экспериментальными результатами испытаний [8, 9], можно сделать вывод, что модель хорошо предсказывает G_{IC} и G_{IIC}^* при зарождении трещины, но затем возможно падение от референсных значений по мере продвижении кончика трещины внутри слоя. Полученные результаты моделирования можно считать удовлетворительными, так как они позволяют прогнозировать поведение КМ при росте трещины.

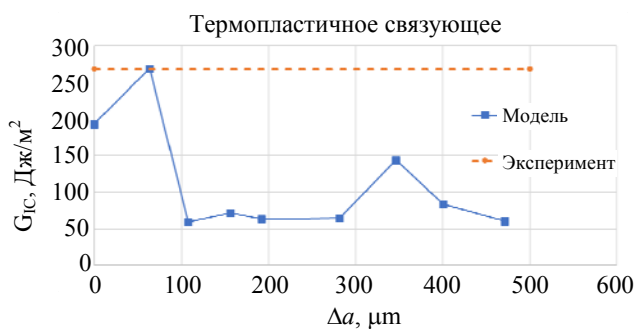


Рис. 4. G_{IC} в зависимости от Δa для термопластичного связующего.

Результаты моделирования вполне логичны: для нормального отрыва значения в среднем ниже, а для сдвигового нагружения трансверсальные волокна вынуждают трещину обходить волокна и тем самым увеличивают рассматриваемые энергетические показатели. При этом последний эффект не наблюдается для термопластичного связующего. Видимо, столь большие предельные деформации позволяют трещине дожидаться возможности продвигаться по наиболее короткому пути.

Заключение

В результате исследования на основе численного моделирования представлено из-

менение параметра трещиностойкости при отрыве G_{IC} в зависимости от длины трещины для термопластичного и реактопластичного связующего. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что модель хорошо предсказывает G_{IC} и G_{IIC} при зарождении трещины, но затем возможно падение от референсных значений по мере продвижении кончика трещины внутри слоя. Исключением является вариант моделирования G_{IIC} для реактопластичного связующего, когда кончик трещины быстро переместился на границу слоев с ростом G_{IIC} . Стоит отметить, что в качестве референсных значений энергетических параметров брались полученные при продольной ориентации образцов. Представленный вариант моделирования материала и реализация других способов расширения возможностей КЭМ расчетов на прочность напрямую влияет на распространение СМТС с использованием прогнозных методов оценки состояния.

Исследование финансируется Министерством науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению о предоставлении субсидии № ЭБ 075-15-2019-1944 (внутренний номер Соглашения 05.607.21.0329) от «18» декабря 2019 г. (уникальный номер RFMEFI60719X0329), прикладные научные исследования проводятся по теме «Разработка базовых проектных решений системы мониторинга технического состояния конструкций и сложных инженерных изделий в интересах обеспечения технологической безопасности, устойчивого функционирования критической инфраструктуры Российской Федерации и развития отраслей отечественной промышленности».

ЛИТЕРАТУРА

1. Фирсов Л. Л., Юргенсон С. А. // Прикладная фотоника. 2017. Т. 4. № 4. С. 280.
2. Kachanov L. // Springer Science & Business Media, 1986.
3. Zinoviev P. A. Grigoriev S. V., Lebedeva O. V., Tairova L. P. // Composites science and technology. 1998. Vol. 58. № 7. P. 1209.
4. Fedulov B. N., Fedorenko A. N., Kantor M. M., Lomakin E. V. // Meccanica. 2018. Vol. 53. № 1–2. P. 359.

* G_{IIC} – характеристика трещиностойкости, энергия срагивания при моде 2 (Дж/м²).

5. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event, Tech. rep. West Conshohocken (PA, USA): American Society for Testing and Materials (ASTM), ASTM D 7136/D 7136M-05; 2005.

6. American Society for Testing and Materials. Standard test for mixed mode I– mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber polymer matrix com-

posites, ASTM, International D6671-01/D6671M-06; 2008.

7. Bolotin V. V. // Composites Part B: Engineering. 1996. Vol. 27B. P. 129.

8. Fedulov B. N., Safonov A. A., Kantor M. M., Lomov S. V. // Composite Structures. 2017. Vol. 163. P. 293.

9. Mollón V., Bonhomme J., Viña J., Argüelles A., Fernández-Canteli A. // Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43. № 3. P. 1676.

PACS: 46.15.-x.

Mathematical modeling of crack growth in composite materials

I. V. Devyatov¹, K. N. Mingaliev², D. V. Tuev¹, and S. A. Iurgenson¹

¹Lomonosov Moscow State University
Bd. 13, 14, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia

²Financial University under the Government of the Russian Federation
49 Leningradsky prospekt, Moscow, 125993, Russia

Received October 30, 2020

The local problem of the stress-strain state of the structure with the development of interlayer damage is considered. A variant (with the possibility of using in monitoring system) of the implementation of the function of the mathematical apparatus for modeling crack growth is presented, and the characteristics of the material behavior are revealed. As a result of a study based on numerical modeling, the change in the fracture toughness parameter during separation GIC depending on the crack length for a thermoplastic and thermosetting binder is presented.

Keywords: structure health monitoring systems, aerotechnics, composite materials, mathematical modeling, micromechanics, finite element method, resistance to cracking.

REFERENCES

1. L. L. Firsov and S. A. Iurgenson, Applied Photonics **4** (4), 280 (2017).
2. L. Kachanov, Springer Science & Business Media, 1986.
3. P. A. Zinoviev, S. V. Grigoriev, O. V. Lebedeva, and L. P. Tairova, Composites science and technology **58** (7), 1209 (1998).
4. B. N. Fedulov, A. N. Fedorenko, M. M. Kantor, and E. V. Lomakin, Meccanica **53** (1–2), 359 (2018).
5. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event, Tech. rep. West Conshohocken (PA, USA): American Society for Testing and Materials (ASTM), ASTM D 7136/D 7136M-05; 2005.
6. American Society for Testing and Materials. Standard test for mixed mode I– mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber polymer matrix composites, ASTM, International D6671-01/D6671M-06; 2008.
7. V. V. Bolotin, Composites Part B: Engineering **27B**, 129 (1996).
8. B. N. Fedulov, A. A. Safonov, M. M. Kantor, and S. V. Lomov, Composite Structures **163**, 293 (2017).
9. V. Mollón, J. Bonhomme, J. Viña, A. Argüelles, and A. Fernández-Canteli, Composites Part B: Engineering **43** (3), 1676 (2012).