



Научная статья

УДК 539.42

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188840>

EDN: <https://www.elibrary.ru/HSEONC>

Метод определения предельной деформации растрескивания полимерных композиционных материалов на основе использования автоматизированного расчетного комплекса ДАР-МАИ

Николай Васильевич Турбин¹, Никита Сергеевич Калущий², Ирина Дмитриевна Ипатьева³✉

^{1, 2, 3} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Российская Федерация

¹ turbinnv@mai.ru, ORCID: 0000-0001-8887-4586, Scopus ID: 57314201500, SPIN: 7826-7739

² kalutskiyns@mai.ru, Scopus ID: 57221947398

³ ilyushinaid@mai.ru✉

Аннотация. Сохранение функциональных свойств конструкций из полимерных композиционных материалов в значительной степени определяется сопротивлением матрицы поперечному растрескиванию. Традиционные методы неразрушающего контроля обладают недостаточной чувствительностью для обнаружения таких повреждений, в связи с чем разработка методов расчетной оценки растрескивания матрицы на этапе проектирования представляет несомненную актуальность. В настоящей работе представлен вычислительный комплекс, базирующийся на модели дискретной механики разрушения (ДМР) и интегрированный в среду конечно-элементного анализа Abaqus/CAE®. Результаты параметрических расчетов демонстрируют, что предельная деформация растрескивания, скорость накопления трещин и характеристики насыщенного поврежденного состояния существенно зависят от толщины пакета и степени группировки слоев с одинаковой ориентацией. Показано, что расчетные значения деформации растрескивания для многослойного пакета значительно превышают консервативную величину предельной поперечной деформации отдельного монослоя. Таким образом, предлагаемый метод представляется рациональным средством снижения консервативности выбора значений толщин полимерных композиционных материалов (ПКМ), что обеспечивает возможность оптимизации массы композитных конструкций без ущерба для их безопасности.

Ключевые слова: растрескивание полимерной матрицы, дискретная механика разрушения композиционных материалов, предельная деформация растрескивания, пользовательская подпрограмма материала UGENS, расчетный комплекс ДАР-МАИ

Для цитирования: Турбин Н.В., Калущий Н.С., Ипатьева И.Д. Метод определения предельной деформации растрескивания полимерных композиционных материалов на основе использования автоматизированного расчетного комплекса ДАР-МАИ // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 3. С. 224–232. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188840>

Original article

Polymer Composite Materials Ultimate Cracking Strain Determining Method Based on Applying the DAR-MAI Automated Computational Complex

Nikolay V. Turbin¹, Nikita S. Kalutskiy², Irina D. Ipatieva³✉^{1, 2, 3} Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation¹ turbinnv@mai.ru, ORCID: 0000-0001-8887-4586, Scopus ID: 57314201500, SPIN: 7826-7739² kalutskiyns@mai.ru, Scopus ID: 57221947398³ ilyushinaid@mai.ru ✉

Abstract

Conventional non destructive evaluation (NDE) techniques exhibit inherently limited sensitivity to the incipient matrix microcracking. This diagnostic constraint underscores the critical need for reliable predictive tools capable of the matrix cracking behavior estimating in polymer composite materials (PCMs) during the preliminary design phase.

The discrete damage mechanics (DDM) model provides a robust theoretical framework for both initiation and propagation of matrix cracks description as functions of the applied strain field, with the intra-laminar fracture toughness of the unidirectional ply serving as the primary material input. To render this approach amenable to the routine engineering strength assessments, a dedicated computational package has been developed and embedded into the Abaqus/CAE[®] finite element environment. The architecture of this package is designed to replicate consistently the logical sequence of the developed procedure for the PCM laminate ultimate cracking strain determining.

The operational workflow of the computational tool is delineated with specific emphasis on the task of ultimate cracking strain prediction. The developed package effectively transfers the DDM methodology from a specialist oriented domain, which requires intimate familiarity with the Abaqus input file syntax and the internal organization of state variables within user subroutines, into the sphere of standard engineering practice. Through an intuitive graphical interface, the engineer specifies material constants (elastic moduli, Poisson's ratios, fracture toughness), stacking sequence, and structural regions using terminology standard in composite design. Concurrently, all low level operations, including the assembly of syntactically correct command blocks, automatic alignment of the number of material definitions and state variables with the actual ply count, and extraction of the unlabeled state variables from the output database, are being executed autonomously by the plugin. This automation not only curtails pre processing time but also substantially mitigates common user induced errors, most notably improper state variable initialization, which frequently results in numerical non convergence. Consequently, the simulated progressive cracking response of layered composites becomes highly reproducible, thereby facilitating systematic comparative parametric studies across diverse material systems and stacking architectures.

A representative numerical example is presented. The results reveal that the laminate cracking strain, the rate of crack density evolution with increasing applied load, and the characteristics of the saturated cracking state are all markedly dependent on both the total laminate thickness and the degree of clustering of identically oriented plies. Owing to the pronounced sensitivity of the ultimate cracking strain to the number of adjacent plies sharing the same fibre orientation, laminate cracking is observed to precede fibre dominated failure—even in the case of a simple stacking arrangement comprising only two consecutive unidirectional layers with identical orientation. Conversely, for practically relevant stacking sequences that minimise such ply grouping (i.e., those with maximally dispersed orientations), the laminate level cracking strain substantially surpasses the transverse ultimate strain of a single ply, which is conventionally adopted as a conservative design criterion for PCM strength evaluation.

It follows that application of the proposed methodology for the laminate specific cracking strain determining offers a rational basis for the inherent conservatism in current thickness sizing practices reducing. This, in turn, provides a tangible pathway towards weight optimisation of the composite structural components without compromising their overall structural reliability.

Keywords: polymer matrix cracking, discrete fracture mechanics of composite materials, ultimate cracking strain, user subroutine UGENS, DAR-MAI computational complex

For citation: Turbin N.V., Kalutskiy N.S., Ipatieva I.D. Polymer Composite Materials Ultimate Cracking Strain Determining Method Based on Applying the DAR-MAI Automated Computational Complex. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(3):224–232. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188840>

List of Figures

Fig. 1. The PCM layer representative element with cracking: *a* — the upper view; *b* — the side view

Fig. 2. The finite element model general view and boundary conditions

Fig. 3. The dependence of the crack density on the applied strain for the $[0_n, 90_n, 0_n]_s$ type stacking sequence

Fig. 4. Dependence of crack density on the applied strain for the layups with various relative lamina thickness $h_{i,90}/h_{90}$ and 90° orientation

Fig. 5. The ultimate cracking strain ε_{2t} dependence on the number of repetitions of laminas in the basic laminate of the type $[0_n, 90_n, 0_n]_s$

Fig. 6. Dependence of the ultimate cracking strain ε_{2t} on the relative the lamina thickness $h_{i,90}/h_{90}$ with an orientation of 90°

List of Tables

Table. Characteristics of the composite monolayer

Введение

Обеспечение структурной целостности ответственных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является актуальной задачей при разработке безопасных и надежных изделий [1–3]. Структурная целостность связана непосредственно как с прочностью, так и с сохранением эксплуатационных свойств конструкции.

Конструкционные ПКМ для несущих конструкций состоят из армирующих волокон и связующего. Под действием нагрузки может произойти растрескивание связующего, которое в дальнейшем создаст условия для развития более опасных дефектов — разрушения армирующих волокон и расслоений [4–10]. Значимость процессов растрескивания матрицы существенно возрастает в условиях эксплуатации из-за наличия переменной температуры и влажности. Так, проникновение и конденсация влаги в уже образовавшихся микротрещинах матрицы способны интенсифицировать накопление повреждений и приводить к потере герметичности материала [11–13]. Вместе с тем традиционные методы неразрушающего контроля, широко применяемые для оценки технического состояния конструкций в процессе эксплуатации, зачастую оказываются малоинформативными применительно к трещинам матрицы. Это объясняется тем, что плоскости таких трещин ориентированы перпендикулярно поверхности ПКМ, что затрудняет их надежное выявление стандартными диагностическими средствами [3, 14–16]. В этой связи особую важность приобретает возможность расчета растрескивания матрицы в ПКМ на этапе проектирования.

Метод расчета растрескивания, основанный на дискретной механике разрушения (ДМР) (англ. Discrete Damage Mechanics, DDM) [5, 17–21], подтвердил свою точность при сопоставлении с экс-

периментальными данными, полученными при квазистатическом механическом нагружении для ряда ПКМ и различными схемами укладки. ДМР представляет собой гибридный подход, объединяющий аналитическую микромеханику повреждений на уровне монослоя с континуальной механикой повреждений на уровне пакета.

Несмотря на точность вычислений, метод дискретной механики разрушения сложно применять в инженерном расчете на прочность, где прочность конструкции определяется путем сопоставления действующих напряжений и деформаций с допускаемыми значениями. Другим недостатком метода дискретной механики разрушения является отсутствие удобной программной реализации. Целью данной работы является разработка метода определения предельной деформации растрескивания ПКМ на основе использования автоматизированного расчетного комплекса.

Методы

Дискретная механика разрушения

Модель ДМР включает уравнения, используемые для вычисления приведенного модуля упругости E_x в зависимости от плотности трещин $\lambda = 1/2l$ и для вычисления зависимости плотности трещин λ от нагрузки на основе представительного элемента объема (ПЭО) пакета ПКМ с трещинами матрицы (рис. 1). В модели ДМР для прогнозирования поврежденного состояния пакета ПКМ под нагрузкой используются два свойства монослоя материала: критические значения скорости высвобождения энергии деформации для трещин I и II типов G_{Ic} , G_{IIc} . При этом учитывается, что наличие соседних слоев сдерживает развитие трещин в слое, что приводит к тому, что кажущаяся поперечная прочность монослоя F_{2l} становится функцией толщины слоя, набранного из монослоев с одной ориентацией.

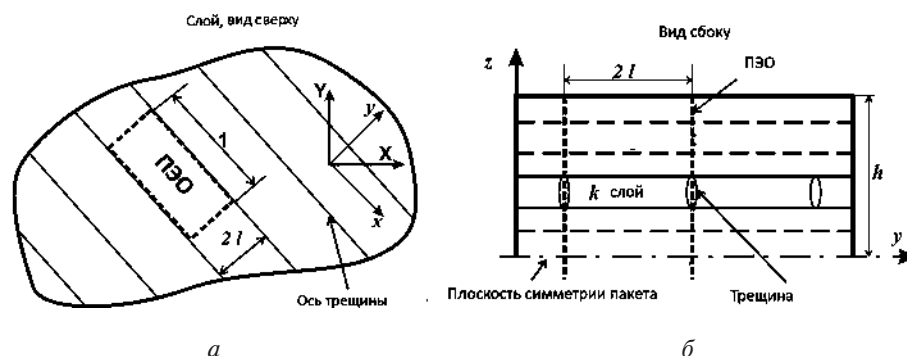


Рис. 1. Представительный элемент объема (ПЭО) слоя ПКМ с растрескиванием:
а – вид сверху; б – вид сбоку

Теоретическая модель ДМР и расчетные выражения подробно описаны в работах [17–19].

Метод определения предельной деформации растрескивания ПКМ на основе автоматизированного расчетного комплекса ДАР-МАИ

Расчетный комплекс ДАР-МАИ реализован на языке Python 2 в соответствии с требованиями встроенного в систему конечно-элементного анализа Abaqus/CAE® [21] графического каркаса AFX (Abaqus Foundation eXtension) и состоит из двух взаимодействующих частей: графического интерфейса, выполняющегося в процессе GUI (Graphical User Interface) CAE (Computer Aided Engineering), и вычислительного модуля, выполняющегося в отдельном процессе ядра системы Abaqus.

Устройство расчетного комплекса ДАР-МАИ полностью соответствует логике метода определения предельной деформации растрескивания ПКМ и включает этапы задания свойств монослоев материалов, укладки, распределения укладки по зонам расчетной модели, собственно расчета плотности трещин от действия нагрузки и постобработки результатов расчета с получением предельной деформации растрескивания матрицы для заданного пакета ПКМ. Далее дается расширенное описание этапов работы расчетного комплекса.

Задание свойств монослоев

Задание свойств монослоев реализовано в специальной вкладке расчетного комплекса, позволяющей создавать, редактировать и хранить в постоянной библиотеке материалов набор упругих, температурных характеристик и характеристик трещиностойкости монослоя: продольные и поперечные модули упругости E_1 , E_2 , модули сдвига в плоскости G_{12} , коэффициенты Пуассона ν_{12} , ν_{23} , коэффициенты линейного температурного расширения α_1 , α_2 , критические значения скорости высвобождения энергии деформации для трещин I и II типа G_{Ic} , G_{IIc} , толщину

монослоя h_0 и начальную плотность трещин. Каждый материал сохраняется под уникальным именем и доступен для повторного использования в других моделях без повторного ввода данных.

Задание укладки ПКМ

Укладки симметричных частей пакета ПКМ задаются в конструкторе укладки, предоставляющем удобный способ задания последовательности монослоев в слое в компактной текстовой форме вида «число монослоев : угол укладки» (например, «1 : 0, 8 : 90, 1 : 0» соответствует симметричной укладке $[0/90_8/0]_8$). Введенная укладка автоматически проверяется и разворачивается в полный список слоев с указанием их числа и множителя толщины монослоя (с учетом принятой в методе ДМР симметрии пакета относительно срединной плоскости), что исключает ошибки ручного подсчета при укладках с большим числом слоев.

Распределения укладки по зонам расчетной модели

В рамках данного этапа ранее созданные материалы и укладки связываются с наборами конечных элементов активной модели Abaqus, которые считываются непосредственно из дерева модели. Один и тот же материал и способ укладки могут быть назначены нескольким зонам конструкции, что удобно при анализе панелей со сложной топологией или локальными усилениями.

Расчет плотности трещин от действия нагрузки

После установления параметров расчетного задания (или его автоматической генерации) запускается процесс построения модели: расчетный комплекс создает копию текущей модели и для каждого сопоставленного набора конечных элементов вычисляет параметры и структуру блока UGENS (User General Shell) [21]. В пользовательской подпрограмме типа UGENS реализована расчетная модель ДМР [17–21].

Постобработка результатов

Поскольку переменные состояния пользовательского материала не интерпретируются стандартными средствами визуализации системы Abaqus как физические величины, плагин реализует собственный модуль извлечения и представления результатов, работающий напрямую с базой данных результатов расчета в формате .odb. В результате работы модуля реализуется построение графиков развития плотности трещин λ и переменных повреждения при поперечном растяжении d_{22} и сдвиге d_{66} в зависимости от времени нагружения — для одного, нескольких или всех слоев укладки одновременно (с указанием диапазона слоев, например «1, 3, 5–7»). Получаемая зависимость плотности трещин от действующей деформации $\lambda(\epsilon_x)$ валидировалась путем сравнения с результатами испытаний на схожих укладках ПКМ [5, 17–21].

На основе зависимости плотности трещин λ от действующей деформации ϵ определяются:

- Деформация растрескивания пакета ϵ_{2r} , при которой наблюдается начало увеличения плотности трещин λ в одном из слоев относительно начального значения. Ввиду того, что величина деформации растрескивания пакета ϵ_{2r} будет естественно зависеть от шага расчета (приращения нагрузки), выбирается такое значение шага расчета, при котором момент увеличения плотности трещин λ сходится. Исходя из опыта расчетов на растрескивание с применением модели ДМР, потребная величина приращения нагрузки в расчете составляет $\Delta\epsilon_x = 0,02\%$.
- Формирование сводного отчета по развитию плотности трещин в формате .html или .csv для выбранных слоев с автоматическим открытием файла результата.

Описание примера расчета

Для иллюстрации работы расчетного комплекса проведено исследование влияния толщины пакета

и количества слоев с ориентацией на величину предельной деформации растрескивания при постоянном процентном соотношении слоев в укладке. Порядок описания расчетного примера соответствует этапам реализации метода определения предельной деформации растрескивания ПКМ.

Свойства монослоя

Для расчета был выбран стеклопластик, ранее использованный в качестве модельного в работах, посвященных теории ДМР [21]. Свойства монослоя выбранного материала приведены в таблице.

Укладки ПКМ

Для исследования влияния увеличения толщины прослойки с направлением 90° на деформацию начала распространения трещин были выбраны укладки $[0_n, 90_n, 0_n]_s$, где $n = 3, 6, 9, 12, 15, 18$. Во всех пакетах выдержано процентное соотношение слоев с разной ориентацией: 66,7% слоев с ориентацией 0° и 33,3% слоев с ориентацией 90° . При варьировании толщины пакета процентное соотношение оставалось постоянным.

Для исследования влияния увеличения количества прослоек с направлением 90° на деформацию растрескивания были выбраны укладки $[0_9, 90_6, 0_9]$, $[0_6, 90_3, 0_6, 90_3, 0_6]$ и $[0_4, 90_2, 0_4, 90_2, 0_4, 90_2, 0_4]$. Во всех пакетах выдержано постоянное процентное соотношение слоев с разной ориентацией: 75% слоев с ориентацией 0° и 25% слоев с ориентацией 90° . Толщина пакета и процентное содержание оставались постоянными.

Расчетная модель

Расчетная модель имитирует регулярный прямоугольный участок конструкции с единой укладкой на всю площадь. На рис. 2 представлен общий вид конечно-элементной модели и граничные условия образца.

Характеристики монослоя композита

Характеристика	Обозначение	Значение
Модуль упругости при растяжении в направлении 0° , МПа	E_1	44700
Модуль упругости при растяжении в направлении 90° , МПа	E_2	12700
Модуль упругости при сдвиге в плоскости укладки, МПа	G_{12}	5800
Коэффициент Пуассона в плоскости укладки	ν_{12}	0,297
Межслоевой коэффициент Пуассона	ν_{23}	0,41
Критическое значение скорости высвобождения энергии деформации (ERR) при разрушении по I моде, кДж/м ²	G_{Ic}	0,254
Критическое значение скорости высвобождения энергии деформации (ERR) при разрушении по II моде, кДж/м ²	G_{IIc}	0,5
Расчетная толщина монослоя, мм	h_0	0,144
Предельная деформация по волокну, %	ϵ_{1f}	1,29

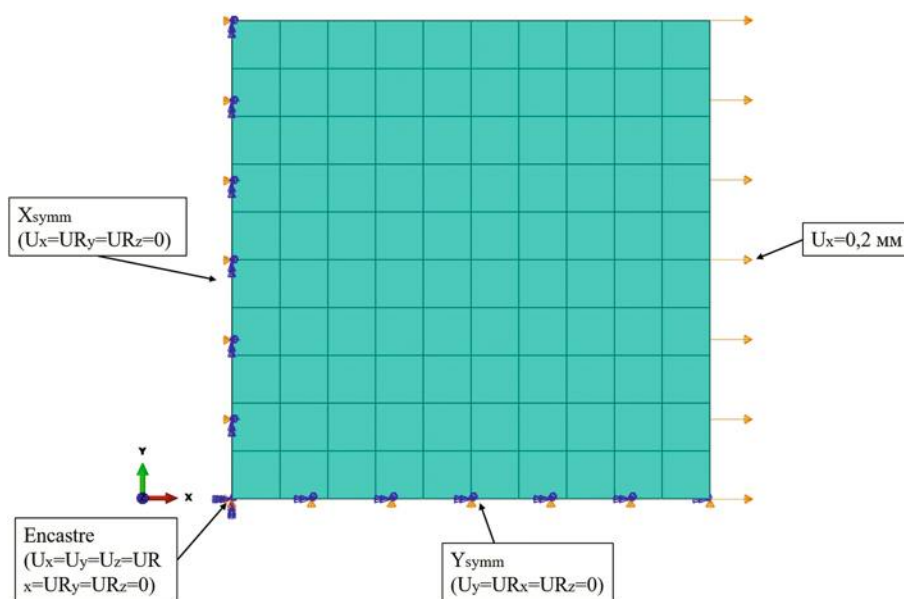


Рис. 2. Общий вид конечно-элементной модели и граничные условия

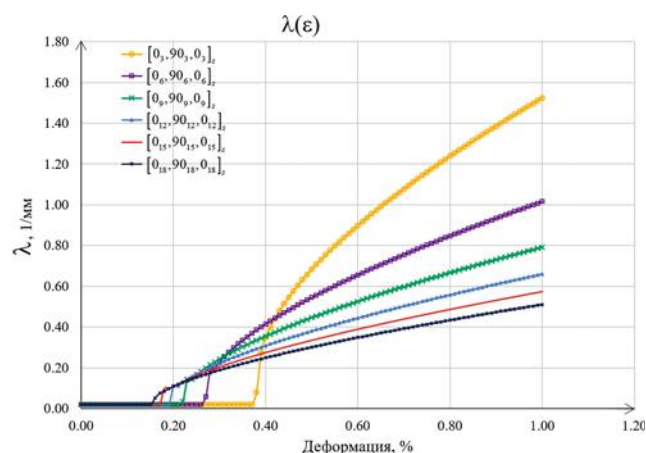
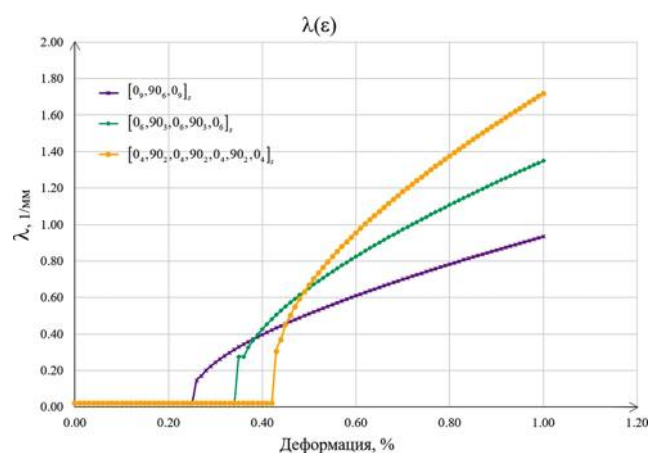
Конечно-элементная модель включает 100 твердотельных элементов типа S4R и 121 узел.

Условия нагружения и закрепления модели имитируют одноосное деформированное состояние, необходимое для предельной деформации растрескивания ПКМ. Направление перемещения и граничные условия показаны на рис. 2, где U_x — перемещение по оси X ; U_y — перемещение по оси Y ; U_z — перемещение по оси Z ; UR_x — вращение вокруг оси X ; UR_y — вращение вокруг оси Y ; UR_z — вращение вокруг оси Z . На вертикальном ребре с координатой $X=0$ задана симметрия относительно оси X , на горизонтальном с координатой $Y=0$ задана симметрия относительно оси Y , жесткое закрепление задано в точке с координатами $X=0$,

$Y=0$. К противоположному вертикальному ребру приложено перемещение $U_x = 0,2$ мм. Направление 0° укладки ПКМ соответствует оси X системы координат модели.

Результаты расчета и обсуждение

Полученные результаты расчетов представлены в виде зависимостей плотности трещин от действующей деформации $\lambda(\epsilon_x)$ (рис. 3 и 4), предельной деформации растрескивания от количества монослоев в слое с ориентацией $90^\circ \epsilon_{2f}(n)$ (рис. 5) и предельной деформации растрескивания от относительной толщины прослойки с ориентацией $90^\circ \epsilon_{2f}(n) = (h_{i,90}/h_{90})$ (рис. 6).

Рис. 3. Зависимость плотности трещин от действующей деформации для укладки типа $[0_n, 90_n, 0_n]_s$ Рис. 4. Зависимость плотности трещин от действующей деформации для укладок с различной относительной толщиной слоя $h_{i,90}/h_{90}$ с ориентацией 90°

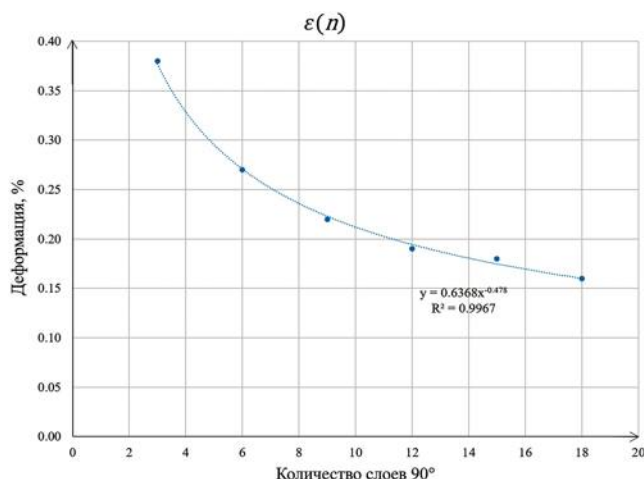


Рис. 5. Зависимость предельной деформации растрескивания ε_{2t} от количества повторений слоев в базовом пакете типа $[0_n, 90_n, 0_n]_s$

Динамика растрескивания ПКМ при изменении количества повторений слоев n в базовом пакете $[0_n, 90_n, 0_n]_s$ и относительной толщины слоя $h_{i,90}/h_{90}$ с ориентацией 90° меняется (см. рис. 3 и 4). При раннем появлении растрескивания скорость его развития с увеличением деформации мала. Плотность трещин, соответствующая насыщению, увеличивается с уменьшением толщины слоя с ориентацией 90° .

С увеличением количества повторений слоев n в базовом пакете $[0_n, 90_n, 0_n]_s$ и с увеличением относительной толщины слоя $h_{i,90}/h_{90}$ с ориентацией 90° предельная деформация растрескивания ε_{2t} ПКМ существенно снижается. В нижнем пределе для пакета $[0_n, 90_n, 0_n]_s$ величина ε_{2t} стремится к типовому значению поперечной прочности для монослоя стеклопластика $\varepsilon_{2t}^0 = 0,16\%$ [17].

Кроме того, для ПКМ вида $[0_m, (90_k, 0_m)_n]_s$ с единичной толщиной слоя с ориентацией 90° (параметр относительной толщины $h_{i,90}/h_{90} = 1/6$) предельная деформация растрескивания $\varepsilon_{2t} = 2,62\%$, что превышает величину предельной продольной деформации монослоя по волокну $\varepsilon_{1t} = 1,29\%$ (см. таблицу). Тем не менее уже при укладке двух подряд монослоев с ориентацией 90° (параметр относительной толщины $h_{i,90}/h_{90} = 1,3$), $\varepsilon_{12t} = 1\%$, растрескивание пакета ПКМ произойдет раньше полного разрушения из-за разрыва волокон. Таким образом, в элементах конструкции ЛА из ПКМ, где растрескивание связующего является неприемлемым, требуется определение допустимой деформации растрескивания с учетом особенностей рабочей укладки пакета.

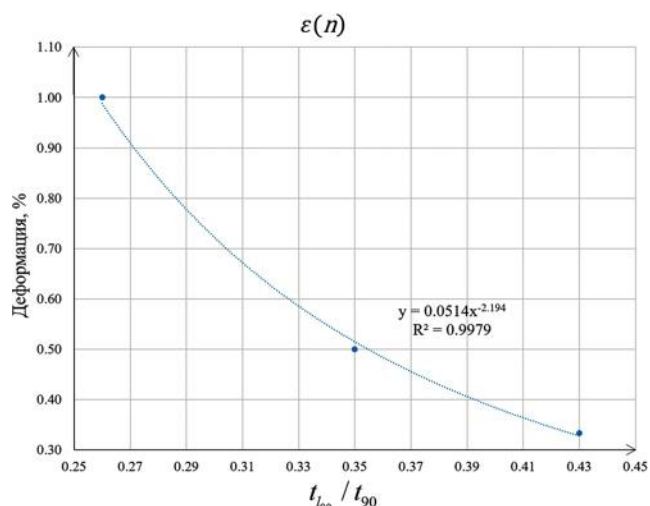


Рис. 6. Зависимость предельной деформации растрескивания ε_{2t} от относительной толщины слоя $h_{i,90}/h_{90}$ с ориентацией 90°

Выводы

Разработанный расчетный комплекс переводит применение метода ДМР из области, доступной только специалистам, детально владеющим форматом входного файла Abaqus и внутренней структурой переменных состояния пользовательской подпрограммы, в область стандартной инженерной практики. Проведенный расчетный пример позволяет сделать выводы качественного и количественного характера. Показано, что в зависимости от толщины пакета ПКМ и группировки слоев с ориентацией 90° существенно меняется деформация растрескивания, скорость накопления трещин по мере увеличения нагрузки, а также характеристики наступления насыщенного трещинами состояния ПКМ. Ввиду выявленной чувствительности предельной деформации растрескивания к количеству сгруппированных слоев с ориентацией 90° , растрескивание пакета ПКМ происходит раньше полного разрушения из-за разрыва волокон уже при укладке двух подряд монослоев с ориентацией 90° . Кроме того, выявлено, что деформация растрескивания для пакета ПКМ с практически значимыми укладками, т.е. с минимальной группировкой слоев одной ориентации, значительно превышает предельную поперечную деформацию монослоя, используемую для оценки прочности ПКМ. Таким образом, определение деформации растрескивания для пакета ПКМ по разработанному методу позволит снизить степень консервативности при выборе толщины ПКМ и веса элемента конструкции.

Конфликт интересов / Conflict of Interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no relevant conflict of interests

Список источников / References

1. Погосян М.А., Турбин Н.В., Староверов О.А. и др. Исследование живучести деталей ЛА из конструкционных полимерных композиционных материалов в условиях циклического сжатия после удара // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 4. С. 126–136. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=186674>
Pogosyan MA, Turbin NV, Staroverov OA, et al. Investigation of the Damage Tolerance of Aircraft Polymer Composite Structures under Conditions of Cyclic Compression after Impact. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(4):126–136. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=186674>
2. Турбин Н.В., Кононов Н.О. Комплексный анализ роста ударных повреждений в композитном элементе конструкции при циклическом сжатии // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 2. С. 108–117. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184996>
Turbin NV, Kononov NO. Complex Analysis of the Impact Damages Growth in the Composite Element Under Cyclic Compression. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(2):108–117. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=184996>
3. Pascoe JA. Slow-growth damage tolerance for fatigue after impact in FRP composites: Why current research won't get us there. *Procedia Structural Integrity*. 2020;28:726–733. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.10.084
4. Molent L, Haddad A. A critical review of available composite damage growth test data under fatigue loading and implications for aircraft sustainment. *Composite Structures*. 2020;232:111568. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111568
5. Turbin N, Shelkov K, Kononov NO, et al. Cyclic damage quantification in composite materials using discrete damage mechanics. *Composite Structures*. 2024;342(3):118271. DOI: 10.1016/j.compstruct.2024.118271
6. Shen H, Yao W, Qi W, et al. Experimental investigation on damage evolution in cross-ply laminates subjected to quasi-static and fatigue loading. *Composites Part B: Engineering*. 2017;120:10–26. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.02.033
7. Griffith JC, Wang S, Palubiski DR, et al. Investigating the microcracking behaviour of a commercial epoxy matrix under cryogenic conditions. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2025;199:109190. DOI: 10.1016/j.compositesa.2025.109190
8. Ghani RH, Dookhi MA. Studying the effect of matrix cracking on the mechanical properties of composite materials. *AIP Conference Proceedings. The National University of Science and Technology International Conference for Engineering Sciences (May 5–6, 2024; Dhi-Qar, Iraq)*. 2025;3303(1):060007. DOI: 10.1063/5.0261931
9. Just G, Koch I, Gude M. Experimental Analysis of Matrix Cracking in Glass Fiber Reinforced Composite Off-Axis Plies under Static and Fatigue Loading. *Polymers*. 2022;14(11):2160. DOI: 10.3390/polym14112160
10. Bashar MT, Sundararaj U, Mertiny P, et al. Study of matrix micro-cracking in nano clay and acrylic tri-block-copolymer modified epoxy/basalt fiber-reinforced pressure-retaining structures. *Express Polymer Letters*. 2011;5(10):882–896. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2011.87
11. Ussorio M. *Development of matrix cracks in cross-ply laminates under bending and their detection using FBG sensors*. University of Surrey. Submitted for the degree of Master of Philosophy; 2004. 230 p.
12. Lebedev MP, Startsev OV, Petrov MG, et al. The Formation of Microcracks during Climatic Aging of Polymer-Composite Materials. *Polymer Science, Series D*. 2023;16:116–123. DOI: 10.1134/S199542122301015X
13. Азаров А.В., Бабичев А.А., Васильев В.В. и др. К проблеме герметичности композитных баллонов давления // Композиты и наноструктуры. 2023. Т. 15. № 1(57). С. 1–12. DOI: 10.36236/1999-7590-2023-15-1-1-12
Azarov AV, Babichev AA, Vasiliev VV, et al. To the problem of pressure-tightness of composite pressure vessels. *Composites and Nanostructures*. 2023;15(1):1–12. (In Russ.).
14. Пантелеев А.В., Турбин Н.В., Тучков Н.А. и др. Методика количественной оценки степени растрескивания слоистого композита по данным компьютерной томографии // Труды МАИ. 2025. № 143. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185657>
Panteleev AV, Turbin NV, Tuchkov NA, et al. Method for tomographic images processing for matrix cracking quantification in composite material. *Trudy MAI*. 2025(143). (In Russ.).
15. Couty V, Berthe J, Deletombe E, et al. Comparing methods to detect the formation of damage in composite materials. *Experimental Techniques*. 2022;47(3):689–708. DOI: 10.1007/s40799-022-00574-5
16. Morokov E, Levin V, Petronyuk Y, et al. Bending damage evolution from micro to macro level in CFRP laminates studied by high-frequency acoustic microscopy and acoustic emission. *Composite Structures*. 2022;288:115427. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115427
17. Barbero EJ, Barbero JC, Ugena CN. Analytical solution for plane stress/strain deformation of laminates with matrix cracks. *Composite Structures*. 2015;132:621–632. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.06.010

18. Barbero EJ, Barbero JC. Analytical solution for bending of laminated composites with matrix cracks. *Composite Structures*. 2016;135:140-155. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.09.021
19. Barbero EJ, Cortes DH. A mechanistic model for transverse damage initiation, evolution, and stiffness reduction in laminated composites. *Composites Part B: Engineering*. 2010;41(2):124-132. DOI: 10.1016/j.compositesb.2009.10.001
20. Barbero EJ, Cosso FA. Determination of material parameters for discrete damage mechanics analysis of carbon-epoxy laminates. *Composites Part B: Engineering*. 2014;56:638-646. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.08.084
21. Barbero EJ. *Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus®*. 2nd ed. CRC press; 2023. 328 p. DOI: 10.1201/b16295

Статья поступила в редакцию / Received 04.08.2026
Одобрена после рецензирования / Revised 01.09.2026
Принята к публикации / Accepted 02.09.2026

Редакторы Л.А. Митина, Е.Л. Мочина, Л.А. Ставцева
Компьютерная верстка В.В. Крючкова

Сдано в набор 14.07.2026. Подписано в печать 28.09.2026.
Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 26,97. Уч.-изд. л. 29,0. Тираж 120 экз. Зак. 782/1507.
Цена договорная

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва А-80, ГСП-3 125993
Типография Издательства МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва А-80, ГСП-3 125993