

Исследование влияния складки в полимерном композиционном материале на его упругие свойства и характер изменения локального напряженно-деформированного состояния

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,
ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля»*

На основе конечноэлементных моделей проведены предварительные исследования влияния дефекта в виде складки в критичном по количеству монослоев пакете идеализированного полимерного композиционного материала по упругим характеристикам, близким к свойствам углепластика. Установлен не критичный уровень влияния снижения модуля упругости полимерного композиционного материала в дефектной зоне и требующий учета уровень повышения интенсивности напряжений композита в локальной области при проектировании ответственных изделий авиакосмической техники.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, конечноэлементные модели, технологические дефекты, складка, локальные характеристики зоны концентрации, упругость, интенсивность напряжений.

В соответствии с классификатором дефектов интегральных конструкций авиакосмической техники (АКТ) из полимерных композиционных материалов (ПКМ) одним из классов механического вида дефектов являются складки армирующего материала [1, 2]. Эти дефекты могут возникать при изготовлении изделий из ПКМ преимущественно ручной выкладкой ткани или лент на формообразующую оснастку чаще всего двойной кривизны [3, 4]. В современных технологиях намотки и автоматизированной выкладки дефекты этого класса не встречаются.

Таким образом, складки являются дефектом ограниченного распространения. Тем не менее представляется необходимым исследовать их влияние на упругие характеристики и локальную несущую способность ответственных изделий АКТ из ПКМ. Для проведения такого анализа использованы конечноэлементные модели многослойного ПКМ. При этом для возможности исследования влияния изменения характера напряженно-деформированного состояния (НДС) по толщине пакета и клеевого слоя рассматривали плоскую задачу (плоскую деформацию) для фрагмента трехслойного пакета с клеевыми прослойками в исходном состоянии и при наличии складки в среднем слое шириной 1 мм.

Геометрические размеры фрагмента пакета в исходном состоянии и при наличии складки показаны соответственно на рис. 1 и 2.

В целях упрощения задачи первый и второй слои ПКМ фрагмента рис. 1 принимали квазиизотропными, т.е. характеристики этих слоев в направлении приложения растягивающей нагрузки и ортогональном принимали одинаковыми.

Эти характеристики материала были соответственно равны:

- для первого слоя: $E=100$ ГПа; $G=38,46$ ГПа; $\mu=0,3$;
- для второго слоя: $E=10$ ГПа; $G=3,85$ ГПа; $\mu=0,3$;
- для третьего слоя: $E=5$ ГПа; $G=1,62$ ГПа; $\mu=0,3$.

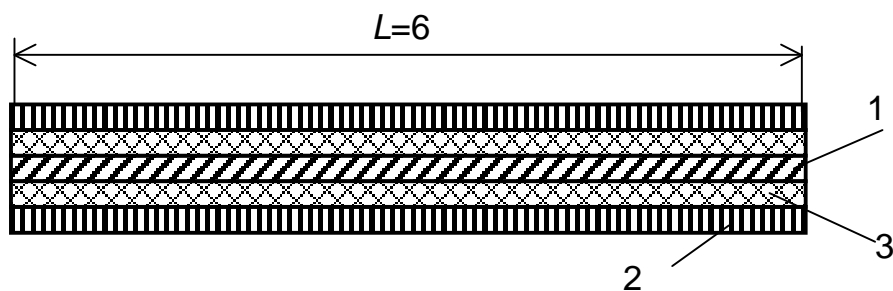


Рис. 1. Вид фрагмента исходного пакета длиной 6 мм:
 1 – слой однонаправленного материала $\varphi=0^\circ$, $\delta=0,12$ мм;
 2 – слой однонаправленного материала $\varphi=90^\circ$, $\delta=0,12$ мм;
 3 – клеевой слой $\delta=0,10$ мм

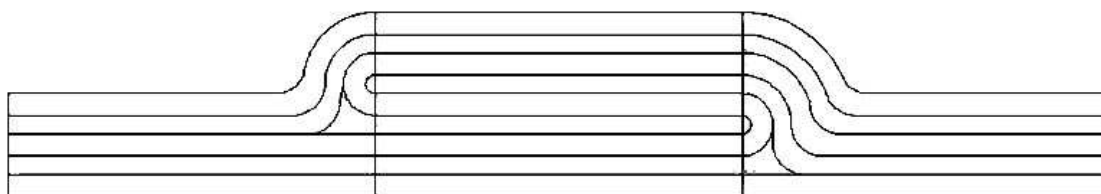


Рис. 2. Вид фрагмента пакета длиной 6 мм со складкой 2 мм в среднем однонаправленном слое

Конечноэлементные модели фрагментов без складки и с поперечной складкой в среднем слое получены генерацией сетки треугольных конечных элементов (типа TRIANG) в автоматическом режиме. Модели закрепляли по всем перемещениям на одном конце и нагружали растягивающей нагрузкой в узлах на другом конце модели. Полученные конечноэлементные модели с условиями закрепления и нагружения показаны на рис. 3 и 4 (размер элементов – 20 мкм).

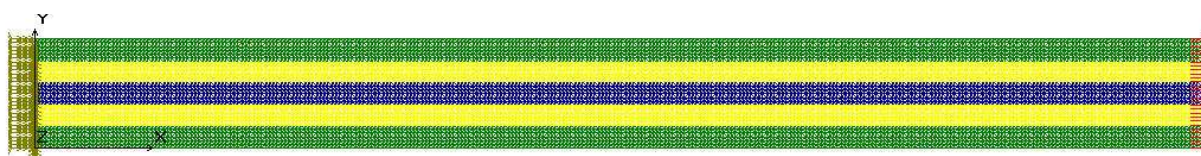


Рис. 3. Конечноэлементная модель фрагмента исходного пакета

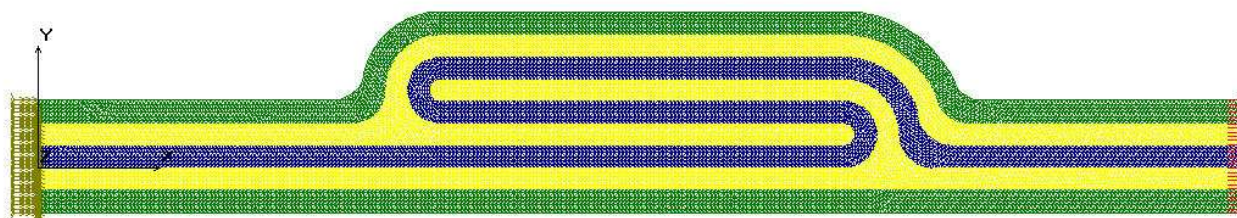


Рис. 4. Конечноэлементная модель фрагмента пакета со складкой

Исходный пакет нагружен усилиями $F_x=0,1$ Н в каждом из 29 узлов, что вызывает средние растягивающие напряжения в пакете $\bar{\sigma}_x = \frac{0,1 \cdot 29}{1 \cdot 0,56} = 5,178$ МПа. Деформированное состояние исходного пакета показано на рис. 5. Перемещение

среднего узла по линии нагружения составило $u_x = 9,94 \cdot 10^{-4}$ мм, что соответствует

$$\text{относительной деформации } \varepsilon_x = \frac{u_x}{l} = \frac{9,94 \cdot 10^{-4}}{6} = 1,65 \cdot 10^{-4}.$$

Модуль упругости пакета $\bar{E}_x = 31,2$ ГПа.

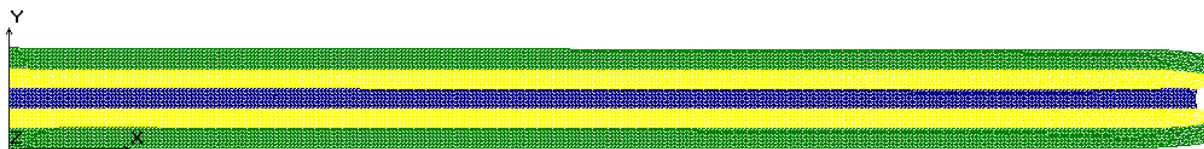


Рис. 5. Деформированное состояние исходного пакета

Картина распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в исходной модели пакета в деформированном состоянии показана на рис. 6. Из этой картины видно, что максимальные значения эквивалентных напряжений (в местах соединения слоев по линии нагружения и на границе средний слой – клей) равны $\sigma_{Von Mises} = 16,9$ МПа. Отношение этих эквивалентных напряжений к средним

напряжениям в исходном пакете составляет $R = \frac{\sigma_{Von Mises}}{\bar{\sigma}_x} = 3,26$.

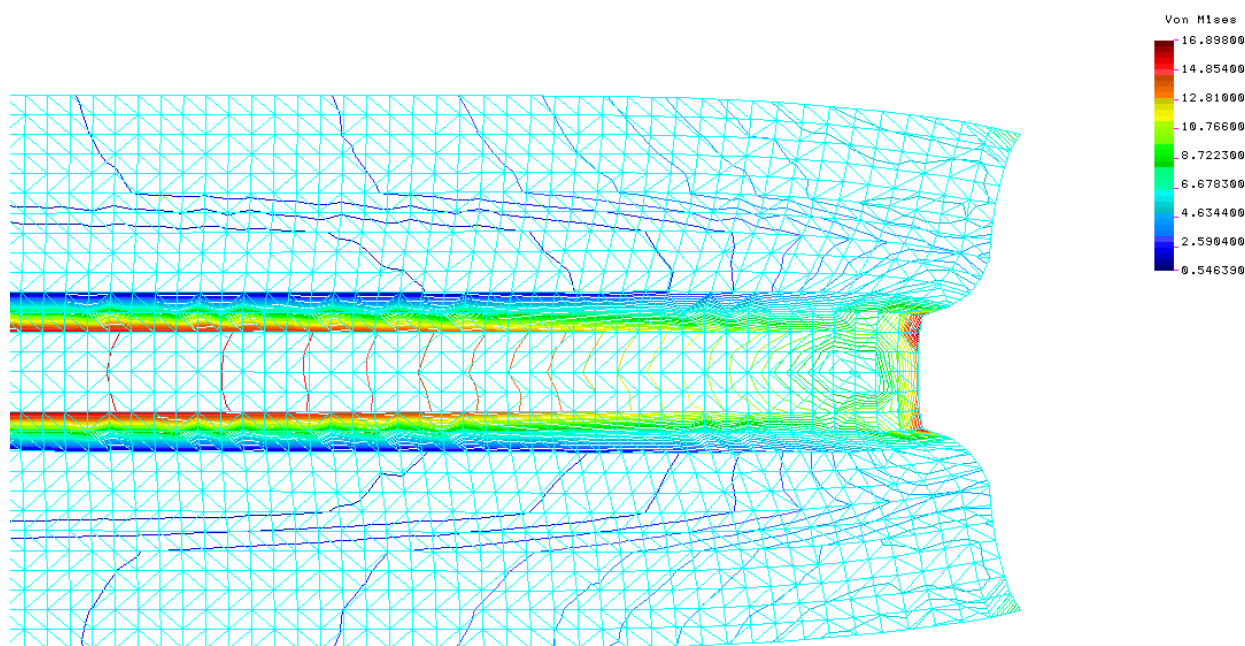


Рис. 6. Картина распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в районе приложения нагрузки к исходному пакету

Пакет со складкой в среднем слое также нагружен усилиями $F_x = 0,1$ Н в каждом из 29 узлов, что вызывает прежние средние растягивающие напряжения в пакете на границе складки $\bar{\sigma}_x = 5,178$ МПа. Деформированное состояние исходного пакета показано на рис. 7. Перемещение среднего узла по линии

нагружения составило $u_x=1,07 \cdot 10^{-3}$ мм, что соответствует деформации

$$\varepsilon_x = \frac{1,07 \cdot 10^{-3}}{6} = 1,78 \cdot 10^{-4}.$$

Модуль упругости пакета $\bar{E}_x=29,06$ ГПа.

Картина распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в модели со складкой в деформированном состоянии показан на рис. 8. Из этой картины видно, что максимальные значения эквивалентных напряжений (в местах соединения слоев по линии нагружения и на границе средний слой – клей) равны $\sigma_{Von Mises}=19,44$ МПа. Отношение этих эквивалентных напряжений к средним

напряжениям в исходном пакете составляет $R = \frac{\sigma_{Von Mises}}{\bar{\sigma}_x} = 3,75$.

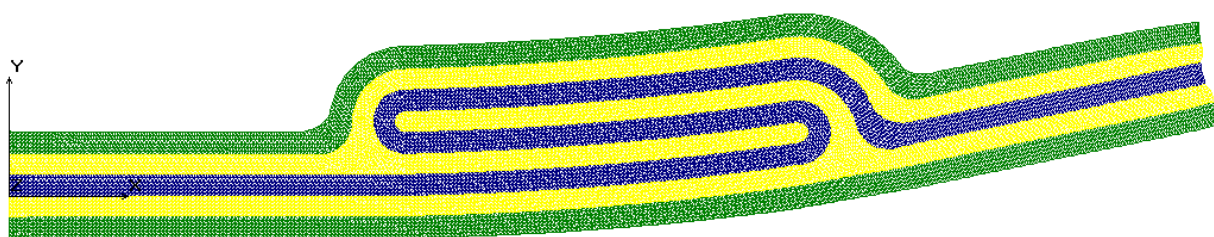


Рис. 7. Деформированное состояние пакета со складкой

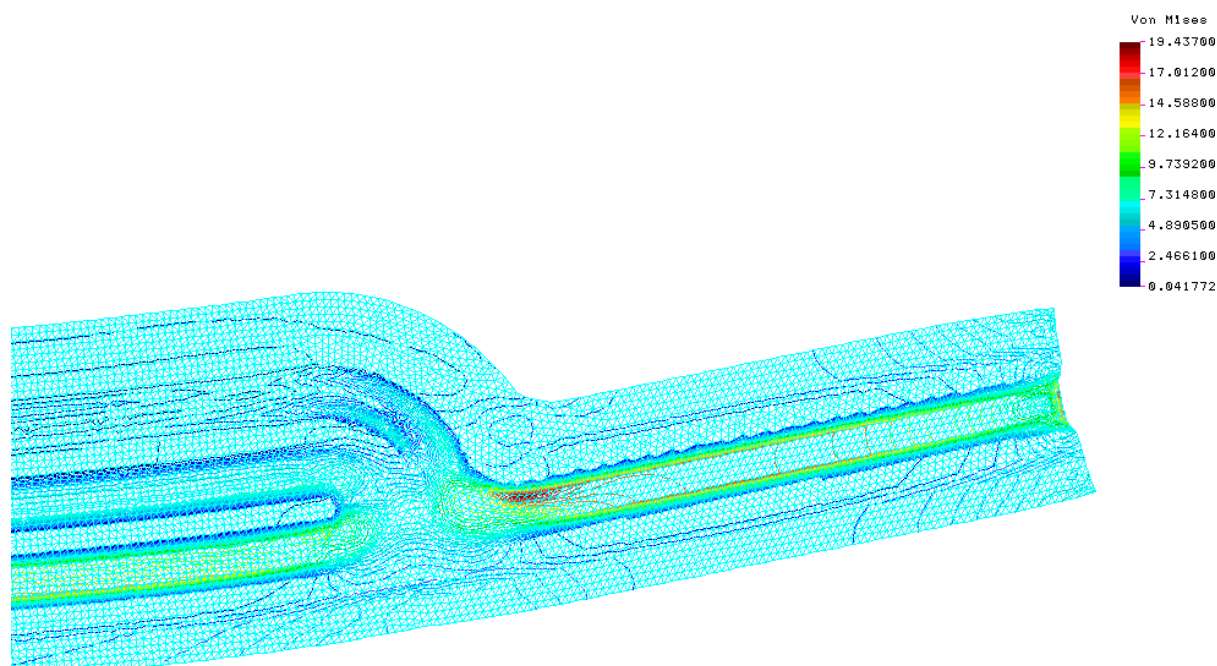


Рис. 8. Картина распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в районе приложения нагрузки к пакету со складкой

Таким образом, рассмотренный частный случай, параметры которого по упругим характеристикам и критическому соотношению слоев (из трех один образует складку), позволяет предположить, что наличие складки вызовет

снижение модуля упругости в локальной области на 3,65% и повышение интенсивности напряжений в этой зоне на 15%.

Выводы

Проведенные выше исследования на конечноэлементных моделях идеализированного пакета ПКМ из минимального количества монослоев с характеристиками упругости, соответствующими свойствам углеродного армирующего материала, позволяют сделать следующие предварительные выводы.

1. Вследствие предельно ограниченного числа монослоев пакета из однонаправленного армирующего материала, один из которых образует складку, представляется обоснованным считать результат этого анализа приближенно отражающим наибольшее по уровню влияние данного дефекта на снижение модуля упругости и повышения интенсивности напряжений в зоне концентрации.

2. Полученный результат анализа свидетельствует о незначительном уровне снижения модуля упругости материала пакета, не превосходящем жесткий допуск на отклонение этой характеристики для ПКМ 3...5%, применяемых в ответственных изделиях АКТ.

3. Уровень превышения интенсивности напряжений в пакете с дефектом в виде складки над таковым в бездефектной структуре этого же пакета свидетельствует о его не критичности, однако заслуживающим внимания расчетчика при проектировании ответственных изделий АКТ из ПКМ.

Список литературы

1. Воробей, В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций [Текст] / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука, 2006. – 400 с.

2. Гайдачук, А.В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Гайдачук, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко // Авиационно-космическая техника и технология. – Вып. 3(70). – 2010. – С. 40 – 49.

3. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів. [Текст] підручник / С.А. Бичков, О.В. Гайдачук, В.Є. Гайдачук, та ін. – К.: ІСДО, 1995. – 376 с.

4. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении [Текст] / под ред. А.Г. Братухинф, В.С. Боголюбовф, О.С. Сироткинф. – М.: Готика, 2003. – 516 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 26.06.12.

**Дослідження впливу складки
в полімерному композиційному матеріалі на його пружні
властивості та характер зміни локального
напружено-деформованого стану**

На основі скінченноелементних моделей проведено попередні дослідження впливу дефекту у вигляді складки в критичному за кількістю моношарів пакеті ідеалізованого полімерного композиційного матеріалу за пружними характеристикам, близькими до властивостей вуглепластика. Встановлено не критичний рівень впливу зниження модуля пружності полімерного композиційного матеріалу в дефектній зоні та рівень підвищення інтенсивності напружень композиту в локальній області, що потребує обліку при проектуванні відповідальних виробів авіакосмічної техніки.

Ключові слова: полімерний композиційний матеріал, скінченноелементна модель, технологічні дефекти, складка, локальні характеристики зони концентрації, пружність, інтенсивність напружень.

**Investigation of the folds influence
in the polymer composite material
on its elastic properties and character of the change
of the local stress-strain state**

Preliminary investigation of the influence of a defect in the form of folds at a critical number of monolayers package made of idealized polymer composite material on the elastic characteristics close to the properties of carbon plastic have been conducted on the basis of finite element models. Non-critical level of influence decrease the elastic modulus of the polymer composite material in the defect zone and increasing the level of stress intensity of the composite in the local area for the design of responsible parts of aerospace engineering has been defined.

Keywords: polymer composite material, finite element model, technological defects, folds, the local characteristics of the zone of concentration, flexibility, stress intensity.