

УДК 539.4

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ
БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Андрющенко Д. А.¹ студент гр. ПС-21 IV курс,
Научный руководитель: Бурнышева Т. В.¹, д.т.н.,

¹Новосибирский государственный технический университет
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20.
E-mail: poolmon741@gmail.com

Введение

К вопросу о численном моделировании усталостного разрушения болтовых соединений деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) следует подходить с учетом специфики накопления микрповреждений в анизотропной среде. Широкое внедрение полимерных композиционных материалов в силовые агрегаты авиационной и ракетно-космической техники обуславливает необходимость высокоточного прогнозирования ресурса соединительных узлов. Болтовые соединения, являясь классическими концентраторами напряжений, в условиях циклического нагружения становятся зонами зарождения межопорных расслоений, растрескивания матрицы и последующего разрушения армирующих волокон. Анализ работ за период 2020–2025 гг. показывает, что классический метод конечных элементов (FEM) в «чистом» виде часто не учитывает сложное взаимодействие между глобальным напряженным состоянием панели и локальными эффектами в зоне контакта болта с отверстием. Инженеры все чаще прибегают к гибридным (комбинированным) схемам и более сложным моделям.

**1. Моделирование расслоения ПКМ вблизи мест крепления
крепежных элементов**

Использование модели когезионной зоны (CZM) позволяет моделировать работу контакта между двумя слоями материала, учитывая свойства каждого из них и наблюдать за развитием повреждений в слоях (Рис.1).

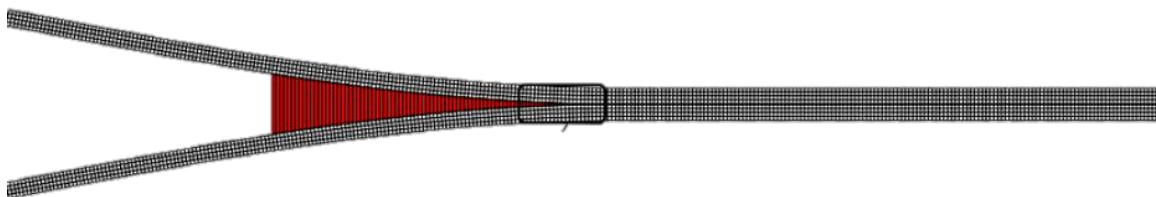


Рис.1. Повреждения в когезионных зонах во время расслоения

Сочетая CZM с методом виртуального закрытия трещины (VCCT), который позволяет вычислять коэффициенты интенсивности напряжений, можно смоделировать условия, при которых трещина начинает расти между слоями, и учесть влияние таких факторов, как усилие затяжки болта и вторичный изгиб в нахлесточных соединениях [1].

2. Моделирование развития трещин в области соединения

В случае исследования распространения трещины в слоях полимерных композитных материалах необходимо перестраивать расчётную сетку модели для точного определения развития трещины. Для решения этой проблемы используются расширенный метод конечных элементов (XFEM) [2]. Основная идея XFEM заключается в аппроксимации функций формы дополнительными обогащающими функциями, которые позволяют учитывать разрывы перемещений и особенности напряжённого поля вблизи фронта трещины. Это позволяет моделировать распространение трещины без динамической перестройки сетки (Рис. 2).

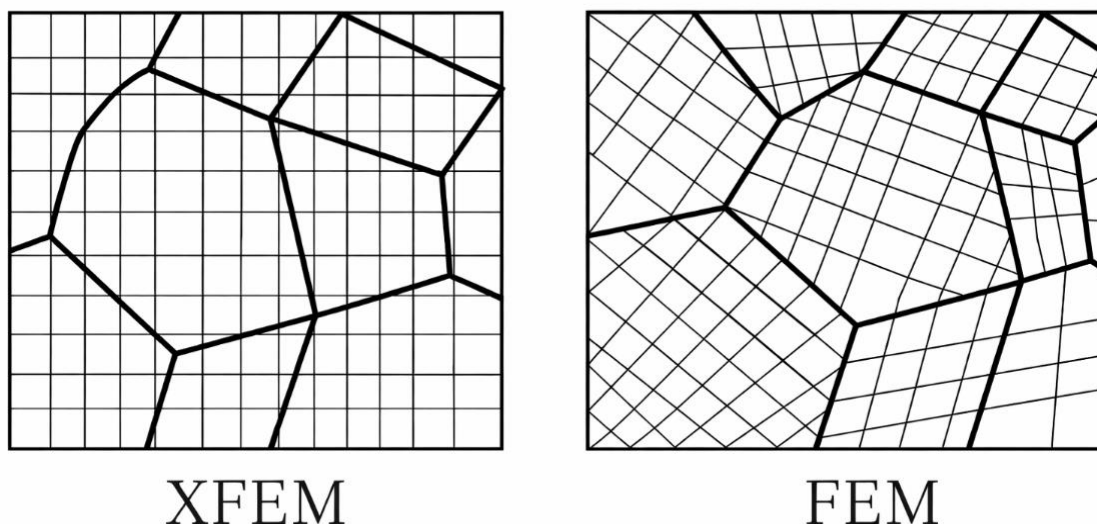


Рис.2. Сравнение XFEM и FEM

3. Использование специализированных конечных элементов

Основная идея заключается в замене детализированной 3D-сетки вокруг болтового соединения на специальный элемент, который сохраняет высокую точность расчетов при сильном снижении вычислительной нагрузки (уменьшение числа степеней свободы на 96%) [3]. Метод основан на аналитическом решении теоретической модели композитной кольцевой пластины с жестким центральным ядром, которая делится на круговые секторы, каждый из которых заменяется балочным элементом с индивидуально настроенной несимметричной матрицей жесткости (Рис.3).

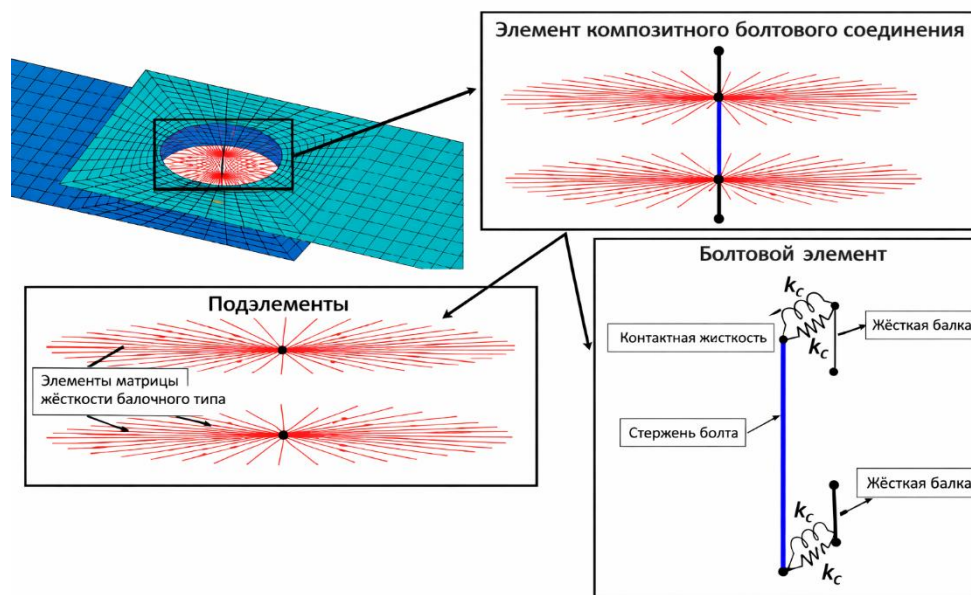


Рис.3. Компоненты специального болтового конечного элемента

Выводы

Рассматривались несколько подходов к численному анализу долговечности узлов крепления из ПКМ, которые позволяют перейти от стандартных расчетных схем к более глубокому пониманию физики разрушения в анизотропной среде. На основании изучения данного вопроса можно прийти к выводу, что использование нескольких подходов дает возможность не просто зафиксировать факт повреждения, но и математически обосновать условия продвижения межслойных дефектов с учетом монтажных напряжений, таких как затяжка болта. Для рационального использования вычислительных ресурсов используются уникальные конечные элементы, позволяющие сократить время вычисления, и расширенный метод конечных элементов, который решает проблему сингулярности в вершине трещины и избавляет от необходимости постоянной перестройки сетки, что существенно ускоряет процесс моделирования при сохранении высокой детализации напряженного состояния.

Список литературы:

1. **Hong, R. C.** Numerical analysis of fatigue evolution of laminated composites using cohesive zone model and extended finite element method [Текст] / R. C. Hong, R. Higuchi, X. Lu, T. Yokozeki // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2024. – P. 18 – DOI: 10.1016/j.compositesa.2024.108653.
2. **Maneval, V.** Progressive Fatigue Modelling of Open-Hole Glass-Fibre Epoxy Laminates [Текст] / V. Maneval, N. P. Vedvik, A. T. Echtermeyer // Journal of Composites Science. – 2023. – Vol. 7, № 12. – P. 516. – DOI: 10.3390/jcs7120516.
3. **Belardi, V. G.** Theoretical definition of a new custom finite element for structural modeling of composite bolted joints [Текст] / V. G. Belardi, P. Fanelli, F. Vivio // Composite Structures. – 2020. – P. 17 – DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113199

