

РАЗРУШЕНИЕ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КОМПОЗИТА С РАССЛОЕНИЕМ В ВЕРШИНЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ТРЕЩИНЫ

Буров А.Е.

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Россия, Красноярск

e-mail: andrey@icm.krasn.ru

Аннотация

Рассматривается модель разрушения однонаправленного волокнистого композиционного материала с расслоением в вершине трещины, поперечной направлению армирования. Используется интегральный подход механики разрушения, в котором особенности напряженно-деформированного состояния в вершине трещины, обусловленные неоднородностью материала и изменением формы концентратора, учитываются введением поправочных функций в критериальное соотношение. Приведены результаты экспериментальных исследований, выполненных на бороалюминиевых образцах с надрезами, которые сравниваются с данными численных расчетов.

Использование волокнистых металлокомпозиатов в авиационной и космической технике обеспечивает значительное снижение массы несущих конструкций при сохранении уровня конструктивной прочности. Трещиноподобные дефекты, которые могут возникать на стадии изготовления материала или в процессе эксплуатации изделия, оказывают влияния на прочность, механизмы разрушения и эксплуатационные качества элементов конструкций. Это определяет необходимость проведения анализа трещиностойкости и механизмов разрушения конструктивных элементов, выполненных из композиционных материалов.

Для распространения трещины под действием приложенной нагрузки необходимо, чтобы максимальное напряжение в вершине трещины превысило предельное значение, соответствующее тому или иному механизму разрушения. Однородным материалам присуще изотропное распределение механических характеристик, поэтому направление распространения трещины зависит только от окружающего ее вершину поля напряжений. Для волокнистых композитов с одноосным армированием свойственно существенная анизотропия прочности, что обуславливает разнообразие возможных механизмов разрушения в вершине трещины, перпендикулярной направлению армирования. Это приводит к тому, что даже в случае симметричного нагружения распространение трещины может происходить не только в направлении, нормальном приложенной нагрузке (рис. 1). В вершине надреза велика вероятность возникновения расслоений вдоль направления армирования раньше, чем трещина начнет распространяться нормально к направлению действия максимальных растягивающих напряжений.

Подобное явление наблюдалось экспериментально для различных типов волокнистых композитов (ВК) не только при циклическом, но и статическом приложении нагрузки [1, 2]. В общем случае под расслоением следует понимать зону поврежденности, ориентированную вдоль направления армирования, состоящую из участков разрушения границы раздела компонентов, пластически деформированной матрицы, обрывов волокон и т.д. Очевидно, что структура зоны и ее протяженность, помимо уровня приложенной нагрузки, определяются свойствами компонентов композита и границы раздела, их объемным содержанием, а также схемой армирования [2]. Так, для композитов типа бороалюминий в вершине надреза, наряду с развитием продольных полос текучести,

характерно разрушение волокон и возникновение расслоений, что подтверждается результатами структурно-имитационного моделирования [4].

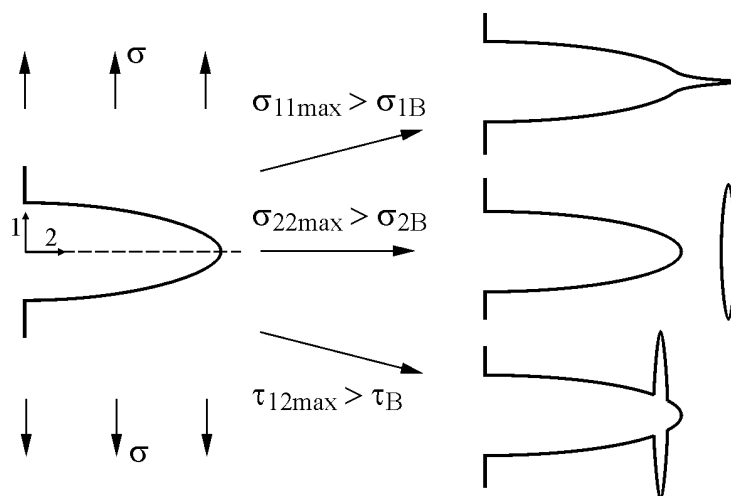


Рис. 1. Механизмы разрушения в вершине трещины, поперечной направлению армирования

Экспериментальные исследования по определению характеристик трещиностойкости бороалюминиевого композита проводились на элементе конструкции, состоящим из центральной трубчатой части с внутренним диаметром 56 мм, толщиной стенки порядка 2,2 мм и концевой арматуры из титанового сплава, обеспечивающей монтаж конструкции. Трубка изготовлена путем горячего прессования 12 слоев однонаправленных полуфабрикатов композита. Среднее объемное содержание волокон составляет 43%. Испытания бороалюминиевых образцов с поперечным надрезом подтвердили описанный выше механизм образования продольных трещин. При постепенном увеличении растягивающей нагрузки в кончиках поперечного надреза возникали симметричные расслоения, которые при повторном приложении нагрузки распространялись вдоль направления армирования. Однако при возрастании нагрузки до определенного уровня происходило разрушение образцов более или менее в поперечном направлении, как и в случае испытания образцов без предварительного циклирования.

Структурная неоднородность и связанные с ней особенности разрушения ВК, накладывают определенные ограничения на применение критериальных соотношений механики разрушения, разработанные для однородных материалов, при проведении расчетов на прочность элементов конструкций из композиционных материалов. Тем не менее, результаты многочисленных исследований указывают на возможность использованию подходов механики разрушения для анализа трещиностойкости композитов и получения зависимостей между предельными параметрами внешних воздействий и размерами дефекта. Наличие в ВК развитой зоны диссипации энергии в вершине дефекта обуславливает разработку моделей разрушения, учитывающих перераспределение напряжений, снижение их концентрации, характерной для однородных материалов. В отличие от традиционных методов расчета на прочность, такие подходы, получившие название нелокальных [5], учитывают напряженно-деформированное состояние не только в исследуемой точке материала (например, в вершине концентратора), но и в примыкающей к ней области. Особенностью нелокальных критериев является введение в критерий прочности структурного

параметра, характеризующего размер области деформированного тела, который является константой материала для конкретного механизма разрушения.

Среди прочих широкое распространение при анализе несущей способности элементов конструкций из ВК с острыми концентраторами получила модель разрушения, известная как подход Нейбера-Новожилова или интегральный критерий прочности. Согласно данному подходу, разрушение определяется напряжением $\bar{\sigma}$, осредненным вдоль отрезка r_c от вершины трещины.

Условие прочности имеет вид:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{r_c} \int_0^{r_c} \sigma_y dr \leq \sigma_B, \quad (1)$$

где σ_y – нормальное растягивающее напряжение вдоль отрезка интегрирования; σ_B – предел прочности материала; r_c – константа материала, физический смысл которой заключается в том, что в зоне размером r_c вблизи вершины трещины происходит перераспределение напряжений, приводящее к снижению их локальной концентрации.

Величину r_c можно оценить, используя результаты испытаний образцов с относительно длинными трещинами. В этом случае размер r_c ничтожно мал по сравнению с длиной трещины. Учитывая, что в вершине трещины справедливо асимптотическое распределение напряжений, напряжения $\bar{\sigma}$ можно выразить через коэффициент интенсивности напряжений K_I (КИН):

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{r_c} \int_0^{r_c} \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} dr = K_I \sqrt{\frac{2}{\pi r_c}} \leq \sigma_B. \quad (2)$$

При разрушении K_I достигает своего предельного значения K_c и, используя знак равенства в правой части, получим:

$$K_c \sqrt{\frac{2}{\pi r_c}} = \sigma_B. \quad (3)$$

Отсюда находим характерный размер:

$$r_c = \frac{2}{\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma_B} \right)^2. \quad (4)$$

Коэффициент интенсивности напряжений K_I , используемый при определении значения осредненных напряжений в (2), однозначно характеризует поле напряжений только для малой (сингулярной) области в вершине трещины. Поэтому соответствие между экспериментальными значениями предельного коэффициента интенсивности напряжений, определенными на образцах различного типа, можно получить, только если процесс разрушения локализован непосредственно в вершине трещины. Если значение параметра r_c превышает размер области корректного применения КИН, необходимо вводить поправки, учитывающие влияние схемы нагружения, относительных размеров образцов и надреза на распределение напряжений. Для этого целесообразно использовать

понятие эффективного коэффициента интенсивности напряжений, значение которого сравнивать с K_c :

$$K_{eff} = K_I \cdot f_1\left(\frac{a}{W}\right) \cdot f_2\left(\frac{a}{r_c}\right), \quad (5)$$

где $f_1(a/W)$ – поправка, зависящая от формы и размеров образцов и трещины, $f_2(a/r_c)$ – интегральная поправка, учитывающая характер распределение напряжений вдали от кончика трещины.

Представление значений характеристик трещиностойкости в форме (5) позволяет с помощью поправочных функций оценить степень влияния различных параметров на сопротивление материала распространению трещины. Эффективный коэффициент интенсивности напряжений в данном случае следует рассматривать как силовую характеристику, связывающую уровень действующей нагрузки и схему нагружения с размером дефекта.

Для прогнозирования разрушения ВК при наличии расслоения в вершине поперечной трещины примем следующие допущения:

1. Трещины расслоения расположены вдоль направления армирования, симметрично относительно кончиков поперечной трещины.
2. Разрушение происходит от вершины расслоений в направлении, перпендикулярном действию нагрузки.
3. Размер зоны предразрушения (длина отрезка интегрирования) r_c равен этому параметру для трещины без расслоения.
4. Образование и рост расслоений, не оказывают существенного влияния на статическую трещиностойкость материала.

Длина расслоения по отношению к размеру основной трещины является основным параметром, влияющим на характер напряженно-деформированного состояние, поэтому удобно представить выражение (5) в виде:

$$K_{eff} = K_I \cdot f_1\left(\frac{a}{W}\right) \cdot f_2\left(\frac{a}{r_c}\right) \cdot f_3\left(\frac{b}{a}\right), \quad (6)$$

где $f_3(b/a)$ – поправка, учитывающая влияние относительного размера продольного расслоения на распределение напряжений; b – размер расслоения. Для трещины без ответвления $f_3(b/a) = 1$.

Для общего случая условие прочности (2) можно записать:

$$K_{eff} = \bar{\sigma} \sqrt{\frac{\pi r_c}{2}} \leq K_c \quad (7)$$

Расчет поправочной функции $f_3(b/a)$ для трубчатого образца с проводился численно, методом конечного элемента с использованием пакета ANSYS [6]. Расслоение моделировалось как отсутствие связи в узлах соседних конечных оболочечных элементов, находящихся по разные стороны от фронта расслоения. На основе полученных значений напряжений, первоначально определялся эффективный коэффициент интенсивности напряжений вдоль линии, перпендикулярной расслоению, начиная от его вершины. Для каждого фиксированного параметра a/R ($2a$ – длина трещины; R – радиус трубки) расчеты выполнялись для различных отношений b/a .

Значение поправки $f_3(b/a)$ получали как отношение K_{eff} , рассчитанное для поперечной трещины с расслоением к величине K_{eff} , определенного для трещины того же размера без расслоения. На рис. 2 построены зависимости поправки $f_3(b/a)$ от длины расслоения для фиксированного $r_c = 4,5$ мм. Это значение характерного размера структуры материала было получено из выражения (4) по результатам испытаний на трещиностойкость бороалюминиевых образцов, вырезанных из трубчатого элемента конструкции. На основании расчетных данных можно сделать несколько выводов:

1. Расслоение снижает концентрацию растягивающих напряжений в вершине поперечной трещины. Чем больше относительная длина расслоения, тем меньше уровень концентрации напряжений.

2. Резкое снижение уровня растягивающих напряжений, по сравнению с трещиной без расслоения, происходит только в малой области непосредственно в вершине расслоения. Поэтому, если процесс разрушения композита определяется уровнем напряжений не в отдельно взятой точке материала, а в некоторой области, влияние расслоения на величину разрушающих напряжений уже не так значительно.

3. При достижении определенного размера, увеличение длины расслоения уже не оказывает существенного влияния на поле напряжений в его вершине.

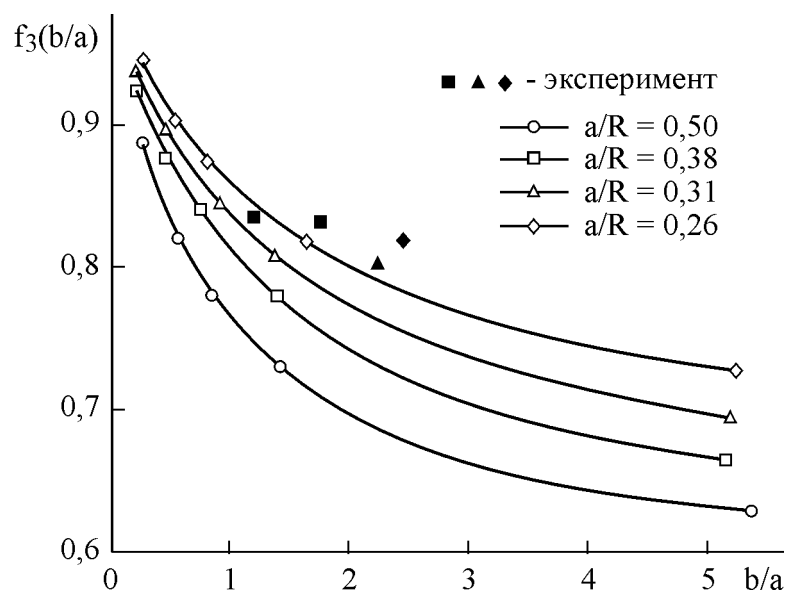


Рис. 2. Зависимость поправочной функции $f_3(b/a)$ от длины расслоения.

Для экспериментальной проверки критерия прочности (6) трубчатые образцы с предварительно нанесенными поперечными надрезами подвергали циклическому нагружению для создания продольных расслоений. Величина максимальной нагрузки отнулевого цикла не превышала 1/3 от предела прочности композита. Затем данные образцы подвергали статическому нагружению до их разрушения. Результаты испытаний приведены на рис. 2 как отношения эффективного КИН, определенного по максимальной разрушающей нагрузке согласно (5), к значению предельного КИН ($K_c = 86,9$ МПа·м^{1/2}), полученному на образцах с поперечным надрезом. Это соответствует значению поправки $f_3(b/a)$ для конкретных соотношений размеров поперечной трещины и продольных расслоений. Наблюдается хорошее соответствие расчетных данных и результатов испытаний. Обоснованность предлагаемой модели разрушения волокнистого композита подтверждается также тем, что разрушение образцов всегда происходило от кончика

продольного расслоения в плоскости, перпендикулярной направлению нагружения, а не от вершины магистральной трещины.

Небольшое отличие значений разрушающих напряжений, рассчитанных по модели, от экспериментальных данных можно объяснить накоплением повреждений структуры композита под действием циклической нагрузки, что снижает сопротивление материала распространению трещины. Это подтверждается тем фактом, что разрушение не всегда происходило от расслоения наименьшей длины, и следовательно, имеющего наибольший уровень напряжений в его вершине. Учитывая вероятностный характер прочности борных волокон, их разрушение возможно при напряжении много меньшем предельного для композита в целом. Наличие поля микродефектов перед фронтом макротрещины оказывает существенно влияние на величину коэффициента интенсивности напряжений, что не учитывается в модели. Другим объяснением может служить различие в расчетной и реальной схемах нагружения образцов. После циклического нагружения размеры трещин расслоения отличались тогда, как в расчетных схемах предполагалось, что ответвления расположены симметрично относительно плоскости поперечной трещины.

Таким образом, предлагаемый критерий разрушения, основанный на сопоставлении полей растягивающих напряжений в окрестности продольного расслоения и нормальных напряжений на линии продолжения поперечной трещины, позволяет оценить влияние расслоений на прочность волокнистого композита с трещиной.

Список литературы

- [1] Хенкок Дж. Р. Усталость композитов с металлической матрицей// Композиционные материалы. Т. 5. Разрушение и усталость. – М.: Мир, 1978. – С.395-439.
- [2] Spearing S.M., Beaumont P.W. Towards a Predictive Design Methodology Based on the Physical Modelling of the Fracture of Fiber Composites// Applied Composite Materials. – 1998. – № 5. – P.69-94.
- [3] Dvorak G.J., Suvorov A.P. Size effect in fracture of unidirectional composite plates// Int. Journal of Fracture. – 1999. – Vol. 95. – P.89-101.
- [4] Буров А.Е., Кокшаров И.И., Москвичев В.В. Моделирование разрушения и трещиностойкость волокнистых металлокомпозитов. – Новосибирск, Наука, 2003. – 176 с.
- [5] Bavaglia S., Mikhailov S.E. Application of a non-local failure criterion to a crack in heterogeneous media// Damage and Fracture Mechanics: Computer aided assessment and control. – Computational Mechanics Publ., 1998. – P.155-164.
- [6] ANSYS Release 5.3. – Swanson Analysis Systems Inc. – Houston, TX, 1996.