

разование микротрещин и пустот, развитие микротрещин по границе раздела волокно-матрица, образование полос сдвига матрицы, раскрытие трещин, катастрофический рост трещин. Показано, что при растяжении модельного однонаправленного композита с полимерной матрицей обнаружены два вида микродефектов в матрице у концов оборванных волокон: дисковидные микротрещины, плоскость которых параллельна плоскости разрушения волокна и искривленные микротрещины, ориентированные под углом 45° к направлению армирования. Установлено, что в КМ «углерод – углерод» основной причиной возникновения микродефектов служит нарушение связи между волокном и матрицей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSFF-2023-0007).

УДК 539.3

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ СЛОИСТОЙ ПЛАСТИНЫ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЙ В ВИДЕ СКВОЗНОГО ОТВЕРСТИЯ

А. Ю. ЕРШОВА, М. И. МАРТИРОСОВ

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Отверстие под механический крепеж является концентратором напряжений для конструкции из любого материала, так как это источник трещин и дефектов, которые снижают несущую способность конструкции в целом.

Для конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) эта проблема стоит особенно остро, так как в этом случае основным несущим элементом является волокно. Как известно, армирующие волокна воспринимают основную долю внешних нагрузок и обеспечивают прочность и жесткость. При разрушении волокна при сверлении отверстия под механический крепеж несущая способность конструкции из ПКМ (стеклопластика и углепластика) значительно падает. Матрица же предназначена для обеспечения монолитности материала и передачи равномерного распределения усилий между армирующими волокнами.

Анализ существующих критериев расчета на прочность элементов конструкций (например, пластин) из ПКМ с концентраторами напряжений показывает, что наиболее достоверные результаты дает критерий Нуизмера [1]. Согласно этому критерию разрушение элемента конструкции из ПКМ при наличии концентратора напряжений в виде кругового отверстия наступает тогда, когда напряжение в некоторой точке, отстоящей от контура отверстия на расстояние d_0 , называемым характеристическим, достигает предела прочности σ_B материала. Характеристический размер d_0 зависит от величины диаметра отверстия d и учитывает разрыхление композита.

В отечественной и зарубежной литературе представлены данные, подтверждающие работоспособность этого критерия, но эти результаты получены для свободных (незаполненных) сквозных отверстий, а также вырезов.

Для отверстия диаметром $d = 6$ мм величина $d_0 = 1$ мм, для отверстий других диаметров

$$d_0 = \left(\frac{d}{6}\right)^{1/2}.$$

Критерий Нуизмера дает приемлемые результаты с точки зрения инженерной практики для случаев разрушения пластин из ПКМ, состоящих из различного числа монослоев, разрывом и может быть рекомендован к практическому использованию [2, 3]. В случае смятия, среза, скола этот критерий дает завышенную оценку прочности.

В данной работе рассматривается распределение напряжений вблизи сквозного отверстия в пластинах из углепластиков различных марок [4, 5] при растяжении, определяется коэффициент концентрации напряжений:

- 1) Cycom 970-38%-3KT650-P-193-1520 W-T6 (углеткань);
- 2) HexPly M21/34%/UD194/IMA-12K (углелента);
- 3) HexPly M21/40%/285T2/AS4C-6K (углеткань);
- 4) HexPly 8552/34%/UD134/ AS4-12K (углелента).

Изучаются следующие смешанные (0° , $\pm 45^\circ$, 90°) симметричные схемы с укладками монослоев в пластинах (16, 14 и 12 монослоев):

- 1) $90^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ / 45^\circ / 0^\circ / 45^\circ / 45^\circ / 0^\circ / 45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 90^\circ / 45^\circ / 90^\circ$;
- 2) $45^\circ / -45^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 45^\circ / -45^\circ / -45^\circ / 45^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 45^\circ$;
- 3) $45^\circ / -45^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 45^\circ / -45^\circ / -45^\circ / 45^\circ / 0^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 45^\circ$.

В работе также исследовано влияние диаметра отверстия (2, 4, 6, 8 мм) на прочность ламината. Дано сравнение полученных результатов с некоторыми имеющимися экспериментальными и теоретическими данными отечественных и зарубежных авторов.

Выработаны практические выводы и рекомендации.

Список литературы

- 1 Witney, J. M. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations / J. M. Witney, R. J. Nuismer // Journal of Composite Materials. – 1974. – Vol. 8. – P. 253–265.
- 2 Оценка прочности металло-композитных соединений с применением критерия Нуизмера / Я. С. Боровская [и др.] // Ученые записки ЦАГИ. – 2018. – Т. XLIX, № 2. – С. 84–92.
- 3 Исследование критериев разрушения композиционных образцов с концентраторами напряжений при сжатии / В.И. Гришин [и др.] // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 58–86.
- 4 Ершова, А. Ю. Испытания образцов «полоса с отверстием» из углепластика с типовой укладкой монослоев на растяжение и сжатие / А. Ю. Ершова, М. И. Мартиросов // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXII Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. – М. : МАИ, 2018. – Т. 1. – С. 102–104.
- 5 Ершова, А. Ю. Экспериментальное исследование влияния температурно-влажностных условий на механические свойства образцов «полоса с отверстием» из полимерного композиционного материала / А. Ю. Ершова, М. И. Мартиросов, Д. В. Дедова // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXVII Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. – М. : МАИ, 2021. – Т. 1. – С. 91–97.

УДК 539.3

СВЯЗНАЯ КВАЗИТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ОБОБЩЕННО-ТЕРМОУПРУГОЙ НЕТОНКОЙ АНИЗОТРОПНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ ОБОЛОЧКИ

С. И. ЖАВОРОНОК

Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва

Ек. Л. КУЗНЕЦОВА

*Институт прикладной механики Российской академии наук, г. Москва
Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Предложена новая вариационная формулировка расширенной теории N-го порядка обобщенно-термоупругих нетонких неоднородных анизотропных оболочек. В соответствии с концепцией описания оболочек как континуально-дискретных систем [1] в основу теории положен Лагранжев вариационный формализм аналитической механики континуальных систем [2] и аналитической термодинамики [3], а также метод редукции пространственной размерности модели [4–7]. Модель оболочки определена на расслоении гладкого многообразия, соответствующего некоторой реперной поверхности (в общем случае не совпадающей со срединной или лицевыми поверхностями) конфигурационным пространством со множеством переменных поля первого рода [8, 9], поверхностной и контурной плотностями функционалов Лагранжа и Рэлея и уравнениями связей [10, 11]. Переменные поля первого рода порождаются коэффициентами разложения полей векторов перемещения и энтропии М. Био [3] по системе функций безразмерной нормальной координаты, образующей биортогональный базис в гильбертовом пространстве над отрезком $[-1, 1]$. Плотности функционалов Лагранжа и Рэлея, зависящие от переменных поля первого рода, их производных по временной переменной и ковариантных производных по криволинейным координатам на многообразии вытекают из исходных формулировок пространственных и граничных плотностей соответствующих