УДК 539.3:629.7.023 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-166-168

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЕ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ РАЗМЕРОВ ОТВЕРСТИЯ

Рыбаков И.А.[1], Крюкова Я.С.[1,2]
[1]Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск;
[2]Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина, Новосибирск

Ключевые слова: полимерный композиционный материал АСМ 102, осреднённые упругие характеристики материала, классическая теория ламинатов, одноосное растяжение пластины с круговым отверстием, коэффициент концентрации напряжений, конечно-элементный анализ в ANSYS.

Аннотация. Численно методом конечных элементов исследовано напряжённо-деформированное состояние прямоугольной пластины из полимерного композиционного материала АСМ 102 с центральным круговым отверстием при одноосном растяжении. Рассмотрена схема армирования, близкая к квазиизотропной. Отношение диаметра отверстия к ширине пластины варьировалось от 0,2 до 0,67. Показано, что коэффициент концентрации напряжений монотонно возрастает с 3,4 до 6,9 вследствие ослабления сечения и влияния свободных кромок. Напряжения в слоях 0° примерно в 2,2 раза превышают осреднённые по пакету, что обосновывает необходимость послойной оценки прочности.

ASSESSMENT OF STRESS CONCENTRATION IN A COMPOSITE PLATE WITH VARYING HOLE SIZES

Rybakov I.A.[1], Kryukova Ya.S.[1,2]
[1]Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk;
[2]Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin, Novosibirsk

Keywords: polymer composite material ASM 102, the averaged elastic characteristics of the material, the classical theory of laminates. uniaxial tension of a plate with a circular hole, stress concentration factor, finite element analysis in ANSYS.

Abstract. The stress-strain state of a rectangular plate made of polymer composite material ASM 102 with a central circular hole under uniaxial tension has been studied numerically by the finite element method. A reinforcement scheme close to quasi-isotropic is considered. The ratio of the hole diameter to the plate width was varied from 0.2 to 0.67. It is shown that the stress concentration factor increases monotonically from 3.4 to 6.9 owing to the reduced net section and the influence of free edges. The stresses in the 0° plies are about 2.2 times higher than those averaged over the laminate, which justifies the need for a ply-by-ply strength assessment.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в авиационной и ракетно-космической технике благодаря высокой удельной прочности, жёсткости и коррозионной стойкости [1]. Однако их слоистая структура и анизотропия требуют особого подхода к оценке напряжённо-деформированного состояния (НДС). В авиастроении композитные детали и панели часто содержат круговые отверстия, приводящие к концентрации напряжений, которую необходимо учитывать при оценке НДС конструкции. Размеры концентратора существенно влияют на уровень напряжений, а для

слоистых материалов эта зависимость определяется схемой армирования и требует численной оценки.

В качестве объекта исследования рассмотрена прямоугольная пластина размерами 90×160 мм и толщиной 2,106 мм с центральным круговым отверстием. Материал – полимерный композиционный материал АСМ 102 на основе эпоксидной матрицы, армированной высокомодульными углеродными волокнами. Механические характеристики монослоя, полученные экспериментально и использованные в расчётах, следующие: модуль упругости E_x = 155 ГПа, модуль упругости E_y = 8,5 ГПа, модуль сдвига G_{xy} = 4,5 ГПа, коэффициент Пуассона ν_{xy}=0,34, толщина монослоя 0,117 мм.

Целью работы является исследование НДС квазиизотропной композитной пластины с центральным отверстием при одноосном растяжении и оценка концентрации напряжений в зависимости от размеров концентратора.

Для квазиизотропного армирования использовался симметричный пакет

$$[0/45/-45/90/0/45/-45/90/0]_s$$

общей толщиной около 2,1 мм (18 монослоёв; 6 слоёв 0°, по 4 слоя +45°, −45° и 90°, поэтому пакет близок к квазиизотропному). Осреднённые упругие характеристики определялись по классической теории ламинатов [2]. По результатам расчёта в осях пластины (ось x направлена вдоль слоёв 0°) получены осреднённые характеристики: E_x = 68,9 ГПа, E_y = 53,8 ГПа, G_{xy} = 20,1 ГПа, ν_{xy} = 0,317, ν_{yx} = 0,248.

Диаметр отверстия варьировался от 18 до 60 мм (отношение диаметра к ширине пластины d/b от 0,2 до 0,67). Растяжение одноосное, приложенная сила F = 10 Н.

Расчёт выполнялся в ANSYS Mechanical APDL [3]. Использовались оболочечные конечные элементы (Shell181). Сетка сгущалась у контура отверстия. Для квазиизотропной укладки анализировались продольные напряжения σ_y и эквивалентные напряжения по Мизесу. Выполнялся послойный анализ, поскольку разные слои находятся в неодинаковом напряжённом состоянии. Номинальное напряжение в сплошной пластине: σ_0 = 0,0556 МПа.

Установлено, что при d/b = 0,2 коэффициент концентрации продольных напряжений составляет 3,44. С ростом отношения d/b усиливается влияние свободных кромок и ослабление сечения, что приводит к монотонному росту концентрации до 6,87 при d/b = 0,67. На рисунке 1 приведена зависимость коэффициента концентрации напряжений от отношения диаметра отверстия к ширине пластины для пластины с осреднёнными характеристиками, на рисунке 2 – максимальные продольные напряжения в слоях пакета (σ_0 – номинальное напряжение в пластине без отверстия).

Получено, что напряжения распределяются между слоями неравномерно: в слоях 0° они примерно в 2,2 раза выше осреднённых по пакету (7,7σ_0 при d/b = 0,2 и 15,4σ_0 при d/b = 0,67), в слоях ±45° составляют 1,8-5,0σ_0, в слоях 90° не превышают 0,8σ_0. Поэтому оценка прочности по осреднённым напряжениям недостаточна, необходим послойный анализ.

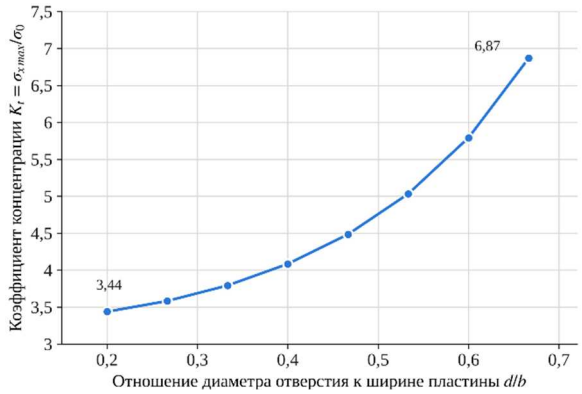


Рис. 1. Зависимость коэффициента концентрации напряжений $K_t = \sigma_{,max}/\sigma_0$ от отношения диаметра отверстия к ширине пластины d/b

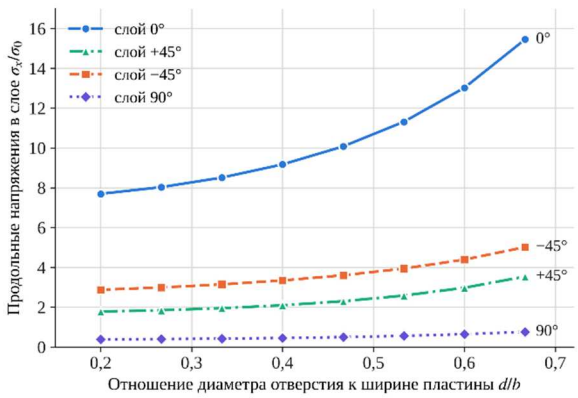


Рис. 2. Максимальные продольные напряжения σ_x/σ_0 в слоях пакета в зависимости от d/b

Полученные зависимости можно использовать при назначении допустимых размеров отверстий в элементах конструкций из ПКМ.

Список литературы

1. Зеленкевич А.Д., Уланов А.М., Уклеин Р.В., Радомский В.К. Проектирование кронштейна подвески перспективного авиационного двигателя из полимерных композиционных материалов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2021. – Т. 20, №2. – С. 45-58.
2. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
3. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. – Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2023. – 1250 p.

Сведения об авторах:
Рыбаков Илья Анатольевич – студент;
Крюкова Яна Сергеевна – к.т.н., доцент кафедры прочности летательных аппаратов НГТУ, старший научный сотрудник научно-исследовательского отделения №2 ФАУ «СибНИА» им. С.А. Чаплыгина.