

## РАСЧЕТ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

Соловьев А.Н., Зиборов Е.Н. (каф. «СМ», ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия)

**Введение** При эксплуатации машин с несущими элементами из полимеркомпозитных материалов может возникать опасное состояние, приводящее к снижению их прочностных и жесткостных свойств. Изменение прочностных и жесткостных характеристик полимеркомпозитных лонжеронов несущего винта вертолета связана с несколькими факторами, среди которых циклические нагрузки, воздействие окружающей среды [1] и др. В настоящее время имеется большое количество научных работ, в которых усталость изучена как экспериментально [2,3], так и путем моделирования [3,4]. Современные конечно-элементные пакеты требуют знания свойств композитов, т.е. либо дополнительных экспериментов, либо восстановления этих свойств путем решения соответствующих обратных задач. Проблемой является моделирование интерфейсных слоев между матрицей и армирующим волокном [5,6].

В работе рассматривается композиционный материал, армирующие волокна которого представляют собой продольные однонаправленные нити. Проводятся расчеты на усталостную прочность в программном комплексе ANSYS WORKBENCH. Проведены две серии расчетов: первая для модельного материала (алюминий и сталь), вторая - для полимеркомпозита, полученного термическим отверждением эпоксидного связующего усиленного стекловолокном. Диапазон напряжений выбран с учетом нагрузки, действующей на лонжерон лопасти несущего винта вертолета. Получены зависимости числа циклов безотказной работы от интенсивности нагрузки.

**Постановка задачи**

В рамках линейной теории упругости [7] рассмотрим композиционный материал, армированный однонаправленными нитями (рис.1, слева) и его элементарный объем содержащий один армирующий элемент (рис.1, справа), считая, что армирующие нити и матрица жестко связаны.

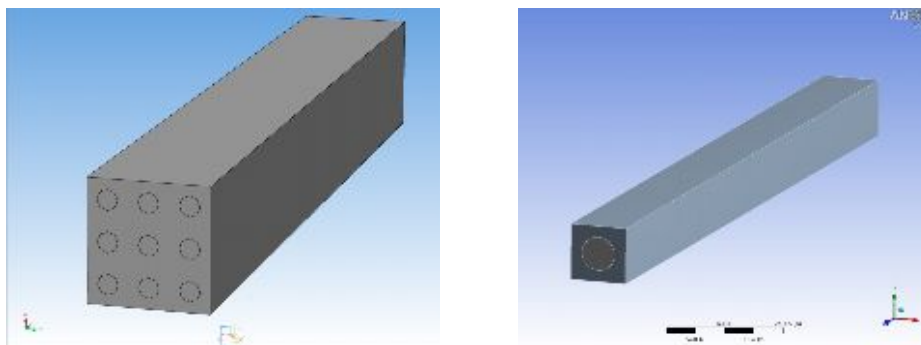


Рис. 1. Армированный композит и его представительный объем

Один торец элемента (рис.1 справа) жестко закреплен на другой действует осевая распределенная нормальная нагрузка, характерная для эксплуатации конструкции, на боковых поверхностях задаются условия гладкого контакта. Характер нагружения принят симметричным с использованием теории SN-None в конечно-элементном пакете Ansys WorkBench. В работе [8] описано, как усталостный ресурс

# ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

может быть найден в закрытой математической форме: когда аналитическую форму S-N кривой объединяют с распределением вероятностей для размахов напряжений.

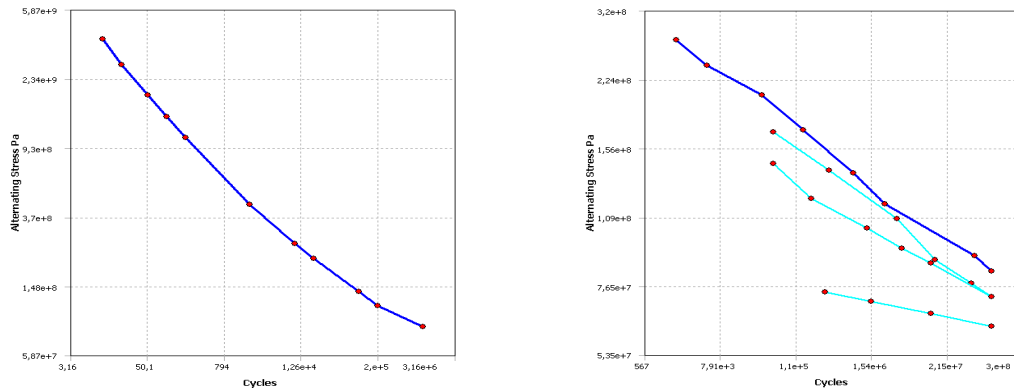


Рис. 2. Кривые усталости для стали (справа) и алюминия (слева)

**Численные результаты.** При решении примера были приняты материалы: сталь и алюминий, их усталостные кривые имеются в стандартных библиотеках модуля ANSYS Workbench, были выбраны конструкционная сталь (армирующие волокна) и алюминий (матрица). Кривые усталости из стандартной библиотеки комплекса ANSYS Workbench представлены на рис.2. (кривые усталости построены в логарифмических координатах рис. 2 справа — сталь, рис. 2 слева — алюминий) на оси абсцисс откладывается количество циклов по оси ординат напряжение в Па. Модуль упругости и коэффициент Пуассона: для стали:  $E=2 \cdot 10^{11}$  Па,  $\nu=0,3$ , для алюминия:  $E=7,1 \cdot 10^{10}$  Па,  $\nu=0,33$ . Сетка конечных элементов построена с использованием параметров по умолчанию, с упорядоченным разбиением и представлена на рис.3, тип элемента 4-х узловой тетраэдр, размером 6-10 мм. (количество узлов — 74089, элементов — 14922.).

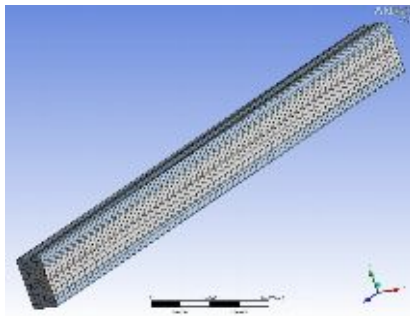


Рис. 3. Конечно-элементная сетка

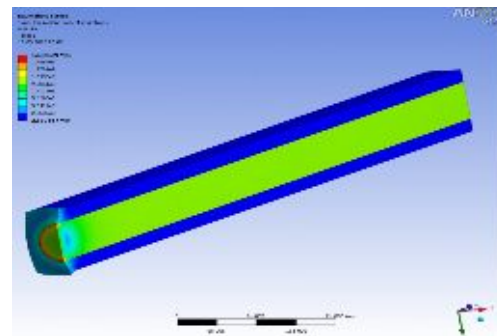


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние

На рис. 4 показана картина напряженно-деформированного состояния (напряжения по Мизесу), полученная в результате статического расчета. На рис. 5 представлены результаты расчета усталостных кривых композиционного материала. Видно (рис.5, слева), что материал не получает усталостных повреждений при выбранном нагружении, кривая для композиционного материала находится между соответствующими кривыми для армирующего волокна и матрицы (рис. 5, справа).

# ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

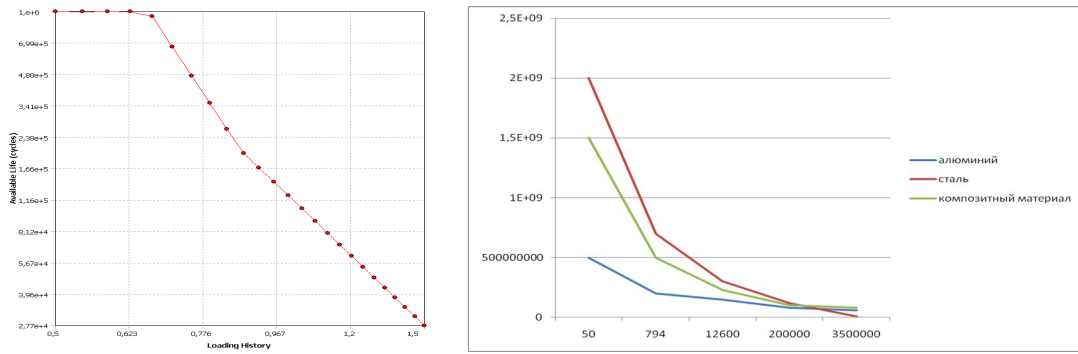


Рис. 5. Кривые усталости композита

Аналогичные расчеты для полимеркомпозита из стекловолокна ( $E=8,7 \cdot 10^{10}$  Па,  $\nu=0,22$ ) и эпоксидной смолы ( $E=2,55 \cdot 10^9$  Па,  $\nu=0,22$ ) представлены на рис. 6, 7.

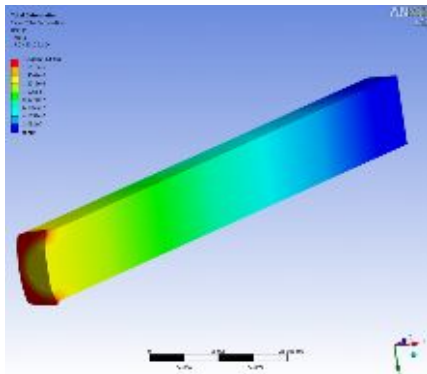


Рис. 6.

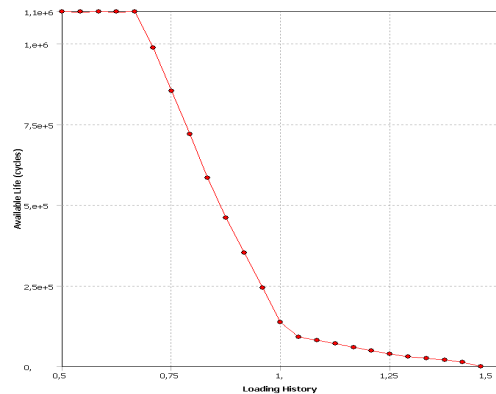


Рис. 7.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 10-08-01296-а, 10-01-00194-а, 10-08-00093-а).

**Список литературы:** 1. Kim Hyo Jin, Seo Do Won. Effect of water absorption fatigue on mechanical properties of sisal textile-reinforced composites // International Journal of Fatigue 28 (2006) 1307–1314. 2. Bathias C. An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials // International Journal of Fatigue 28 (2006) 1094–1099. 3. Paepegem W. Van, Degrieck J. De Baets P. Finite element approach for modelling fatigue damage in fibre-reinforced composite materials // Composites: Part B 32 (2001) 575-588. 4. Sekine Hideki, Yan Bo, Yasuho Takeshi Numerical simulation study of fatigue crack growth behavior of cracked aluminum panels repaired with a FRP composite patch using combined BEM/FEM // Engineering Fracture Mechanics 72 (2005) 2549–2563. 5. Buryan O. K., Novikov V. U. Modeling of the interphase of polymer-matrix composites: determination of its structure and mechanical properties // Mechanics of Composite Materials, Vol. 38, No. 3, (2002) 187-198. 6. Alvarez V.A., Valdez M.E., Va'zquez A. Dynamic mechanical properties and interphase fiber/matrix evaluation of unidirectional glass fiber/epoxy composites / Polymer Testing 22 (2003) 611–615. 7. Новацкий В. Теория упругости. «Мир»; Москва; 1975. 8. S.Gran "A Course in Ocean Engineering", <http://www.dnv.no/ocean/course.htm>.