УДК 539.3

РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ FORTU

Гоменюк С.И., к.ф.-м.н., доцент

Запорожский государственный университет

В статье описано применение инструментальной системы анализа задач механики FORTU для численного исследования методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния конструкций из композитных материалов. Рассмотрено применение макро- и микроподхода для расчета таких классов задач.

Ключевые слова: метод конечных элементов, система FORTU, композитные материалы, многослойные пластины

Гоменюк С.І. РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЙ ІЗ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СИСТЕМИ FORTU / Запорізький державний університет, Україна

У статті описано застосування інструментальної системи аналізу задач механіки FORTU для чисельного дослідження методом скінченних елементів напружено-деформівного стану конструкцій із композитних матеріалів. Розглянуто застосування макро- та мікропідходів для дослідження таких класів задач.

Ключові слова: метод скінченних елементів, система FORTU, композитні матеріали, багатошарові пластини

Gomenyuk S. SOLUTION OF DESIGNS FROM COMPOSITE OF MATERIALS WITH USE OF INSTRUMENTAL SYSTEM FORTU / Zaporizhzhya State University, Ukraine

In article the application of instrumental system of the analysis of problems of the mechanics FORTU for numerical research by a method of finite elements is intense - is deformed condition of designs from composite of materials is described. The application macro- and microapproach for research of such classes of tasks is considered.

Key words: a method of final elements, system FORTU, composite materials, mulilayer of a plate

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании современных машин и механизмов, эксплуатация которых осуществляется в режиме повышенных механических или температурных нагрузок, в настоящее время часто используются композитные материалы, прочностные и термоустойчивые характеристики которых значительно превосходят свойства традиционных материалов. Однако для их практического применения требуется наличие эффективных и научно обоснованных численных методов, при помощи которых можно было бы моделировать напряженно-деформированное состояние конструкций из композитных материалов.

Метод конечных элементов (МКЭ) успешно зарекомендовал себя как один из наиболее эффективных численных методов, применяемых для исследования напряженно-деформируемого состояния. Однако его применение для исследования конструкций из композитных материалов требует учета специфики их внутреннего строения. Как правило, современные композитные материалы состоят из армирующей основы и наполнителя или (и) нескольких слоев прочных материалов, соединяемых между собой некоторым более мягким (и дешевым) наполнителем. Для численного расчета конструкций из композитных материалов чаще всего применяют два подхода: *микроподход* – когда учитывается внутренняя структура материала, и *макроподход* – когда фактически материал рассматривается как сплошное анизотропное вещество. Практическая реализация микроподхода с помощью МКЭ осложняется проблемой построения соответствующей конечно-элементной модели, учитывающей внутреннюю структуру материала. Однако она позволяет получить более точные результаты. Реализация макроподхода требует предварительного экспериментального получения упругих характеристик композита по разным направлениям, зато сам расчет сложностей не представляет.

В данной статье описано применение инструментальной системы анализа задач механики FORTU [1,2] для расчета конструкций из композитных материалов. В качестве тестовой задачи решались задачи о четырехосном изгибе пластины из композитного материала [3].

ПЛАСТИНА ИЗ ПЛАСТМАССЫ, АРМИРОВАННОЙ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ

На рис. 1 приведена расчетная схема задачи о четырехосном изгибе пластины из пластмассы, армированной углеродным волокном.

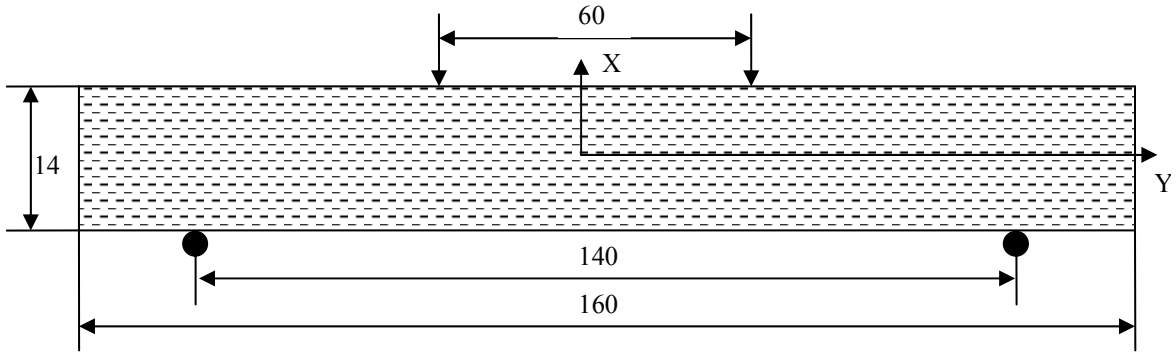


Рис. 1. Испытание на четырехосный изгиб пластины

С помощью препроцессора системы FORTU была получена дискретная модель пластины, состоящая из 1120 конечных элементов в форме линейных треугольников и 640 узлов (Рис. 2). Для учета композитной структуры пластмассы был использован макроподход. Так как силы, действующие на пластину, направлены перпендикулярно плоскостям расположения углеволокна, рассматривалось плоскостное направление. Упругие постоянные: $E_x = 14000\ кг/мм^2$, $E_y = 3000\ кг/мм^2$, $G_{xy} = 938\ кг/мм^2$, ν_{xy}= 0,30 $кг/мм^2$, ν_{yz}= 0,33 $кг/мм^2$.

Уравнения состояния в плоскостном направлении имеют вид [3].

$$\sigma_x = \frac{E_2}{(1+\nu_1)(1-\nu_1-2n\nu_2^2)}\left[n(1-n\nu_2^2)\varepsilon_x + n\nu_2(1+\nu_1)\varepsilon_y\right],$$

$$\sigma_y = \frac{E_2}{(1+\nu_1)(1-\nu_1-2n\nu_2^2)}\left[n\nu_2(1+\nu_1)\varepsilon_x + (1-\nu_1^2)\varepsilon_y\right],$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E_2}{(1+\nu_1)(1-\nu_1-2n\nu_2^2)} m_2(1+\nu_1)(1-\nu_1-2n\nu_2^2)\varepsilon_{xy},$$

$$n = \frac{E_1}{E_2}, \quad m_2 = \frac{G_2}{E_2}, \quad E_1 = E_x, \quad E_2 = E_y, \quad \nu_1 = \nu_{zx}, \quad \nu_2 = \nu_{yz} = n\nu_{xy}.$$

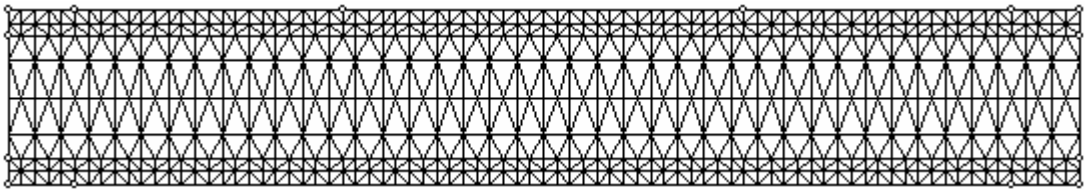


Рис. 2. Дискретная модель пластины

Расчет был выполнен в перемещениях. Фрагмент программы на языке FORTU-2, описывающий вышеприведенные соотношения, имеет вид:

```
...
E1      = Ex
E2      = Ey
G2      = Gxy
m1      = mzx
m2      = mxy * E2 / E1
n       = E1 / E2
```

```
m       = G2 / E2
k1      = 1 - m1 - 2 * n * (m2^2)
k2      = E2 / (1 + m1) / k1

Exx     = diff(u,x)
Eyy     = diff(v,y)
Exy     = diff(u,y) + diff(v,x)

Sxx     = k2 * (n * (1 - n*m2^2) * Exx + n * m2 * (1 + m1) * Eyy)
Syy     = k2 * (n * m2 * (1 + m1) * Exx + (1-m1^2) * Eyy)
Sxy     = k2 * m * (1 + m1) * k1  * Exy

U       = 0.5*Integral(Sxx & Exx + Syy & Eyy  + Sxy & Exy)
…
```

Распределение основных функций по пластине, полученное при помощи постпроцессора системы FORTU, приведено на рис. 3-10.

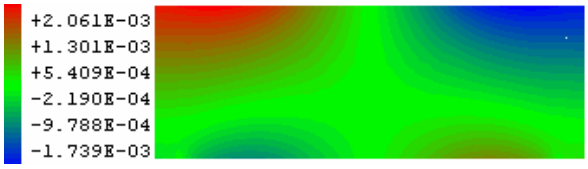


Рис. 3. Перемещение u

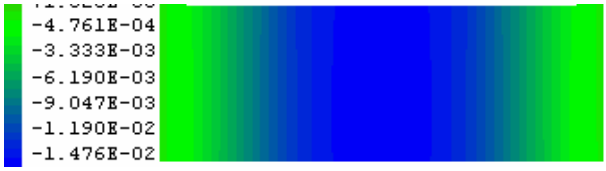


Рис. 4. Перемещение v

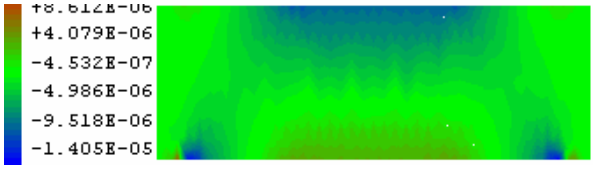


Рис. 5. Деформации ε_x

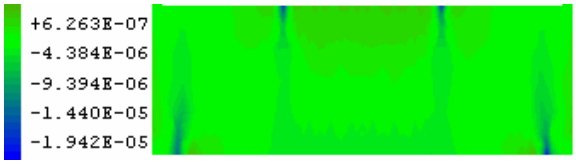


Рис. 6. Деформации ε_y



Рис. 7. Деформации ε_{xy}

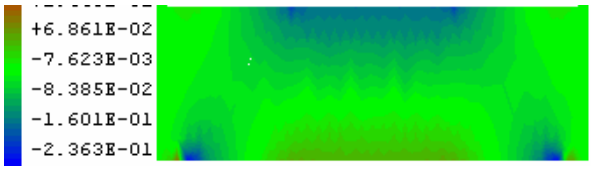


Рис. 8. Напряжения σ_x

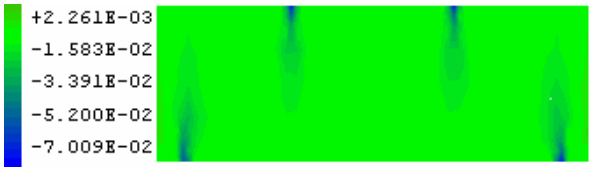


Рис. 9. Напряжения σ_y



Рис. 10. Напряжения σ_{xy}

На рис. 11 приведено распределение напряжений σ_x по различным слоям пластины ($y = -7, y = -5, y = 0$).

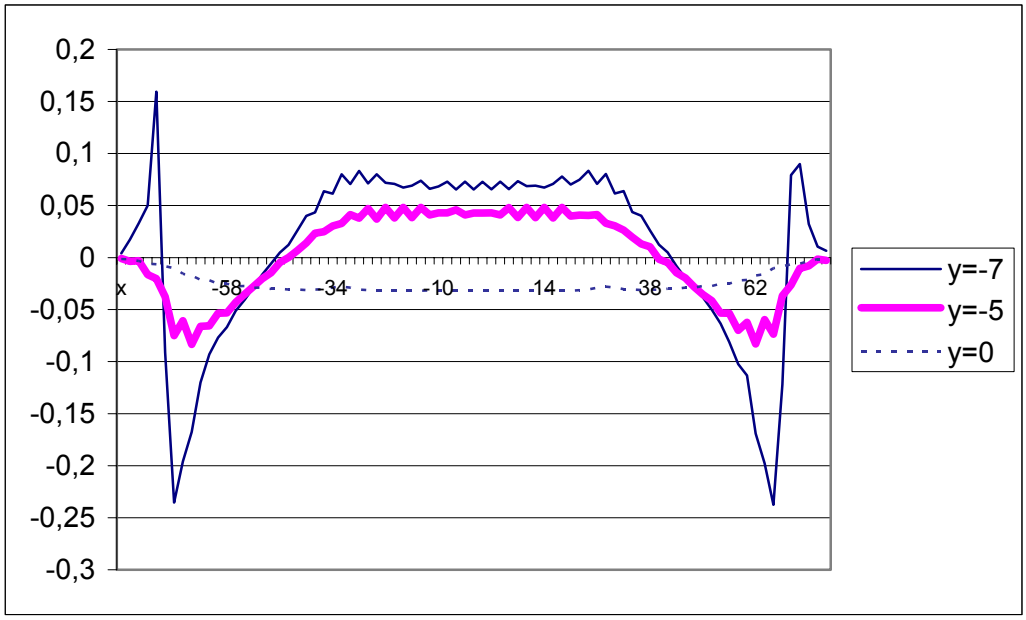


Рис. 11. Распределение σ_x по слоям пластины из пластмассы, армированной углеродным волокном

ПЛАСТИНА ИЗ ПЛАСТМАССЫ, АРМИРОВАННОЙ СТЕКЛОВОЛОКНОМ

Расчет производился по той же схеме, что и в предыдущем разделе. Упругие постоянные: $E_x = 2000\ кг/мм^2$, $E_y = 400\ кг/мм^2$,

$G_{xy} = 137\ кг/мм^2$, $\nu_{xy} = 0{,}30\ кг/мм^2$, $\nu_{yz} = 0{,}33\ кг/мм^2$.

На рис. 12 приведено распределения напряжений σ_x по различным слоям пластины.

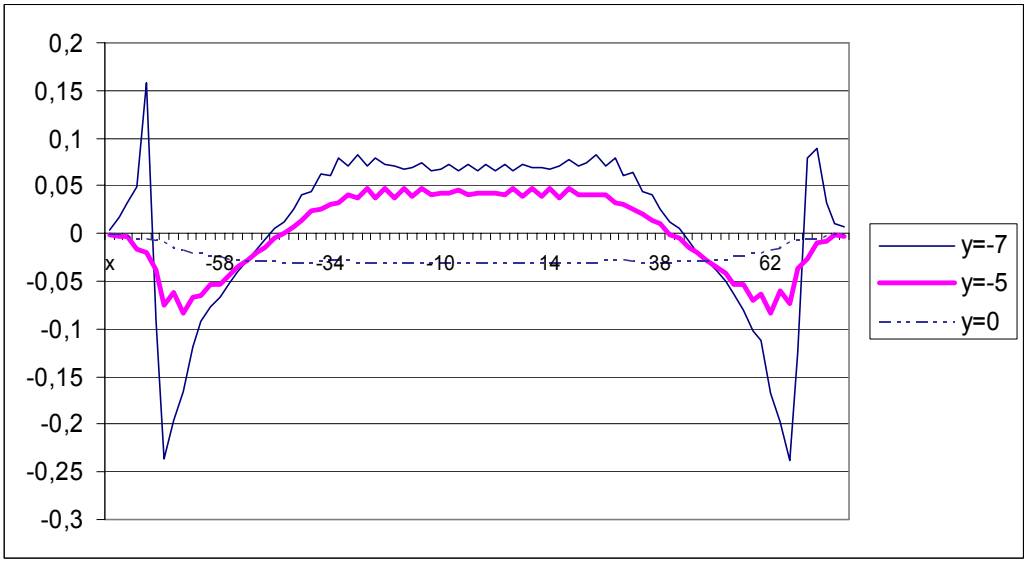


Рис. 12. Распределение σ_x по слоям пластины из пластмассы, армированной стекловолокном

СЛОИСТАЯ ПЛАСТИНА С НАПОЛНИТЕЛЕМ

На рис. 13 приведена расчетная схема задачи о четырехосном изгибе слоистой пластины с наполнителем. В качестве наполнителя, расположенного в центральной части пластины, использовалась пластмасса, армированная углеволокном, а в качестве облицовочного материала -

пластмасса, армированная стекловолокном.

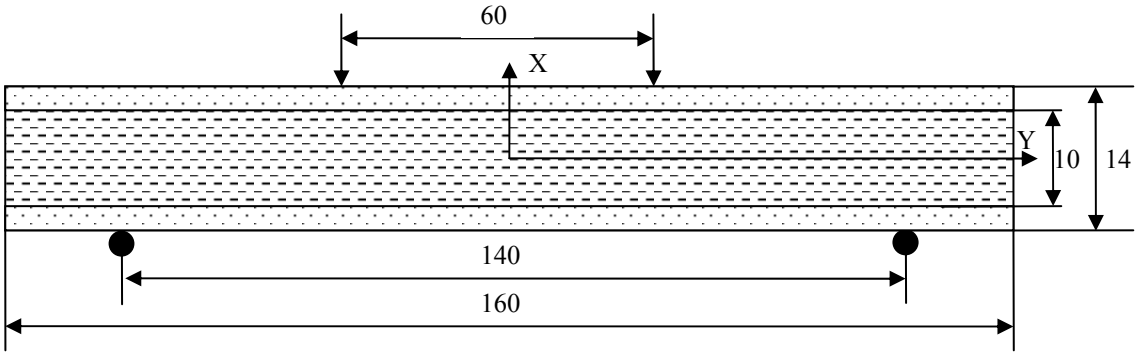


Рис. 13. Испытание на четырехосный изгиб многослойной пластины

Для расчета такого комбинированного композита использовался гибридный метод, сочетающий в себе макро- и микроподход. Конечно-элементная дискретная модель, используемая в расчете, приведена на рис. 2.

В таблице 1 приведены упругие характеристики пластмассы армированной стекловолокном и пластмассы армированной углеволокном, использовавшиеся в расчете. Фрагмент программы на FORTU-2, описывающий упругие постоянные, имеет вид:

…

```
IF y > 5 OR y < -5
   E1 = Ex1
   E2 = Ey1
ELSE
   E1 = Ex2
   E2 = Ey2
ENDIF
```

…

Таблица 1. - Характеристики пластмасс

•	• Пластмасса, армированная углеродным волокном	• Пластмасса, армированная стекловолокном
• $E_x, кг/мм^2$	• 14000	• 2000
• $E_y, кг/мм^2$	• 3000	• 400
• $G_{xy}, кг/мм^2$	• 938	• 137
• $\nu_{xy}, кг/мм^2$	• 0.30	• 0.30
• $\nu_{yz}, кг/мм^2$	• 0.33	• 0.33

На рис. 14 приведено распределение напряжений σ_x для различных слоев пластины ($y = -7,\ y = -5,\ y = 0$).

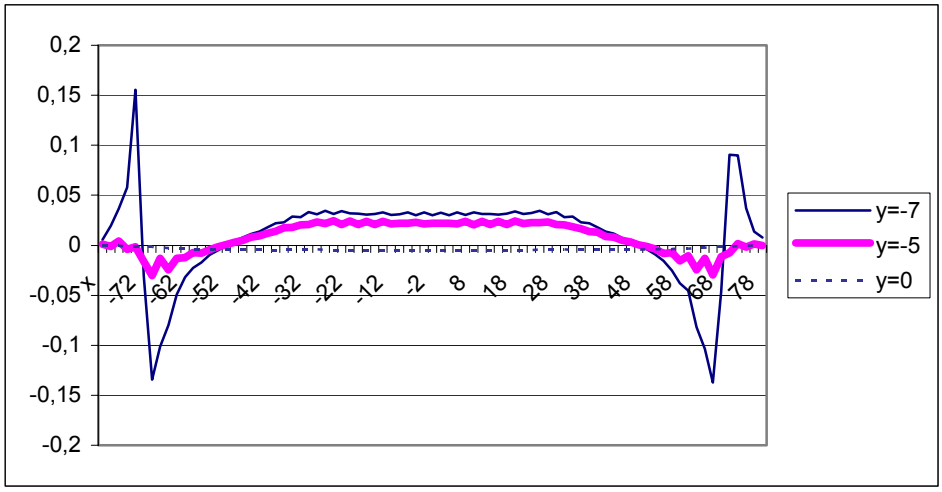


Рис. 14. Распределение σ_x по многослойной пластине

На рис. 15 приведено сравнительное распределение напряжений σ_x по центру пластины для различных случаев материала.

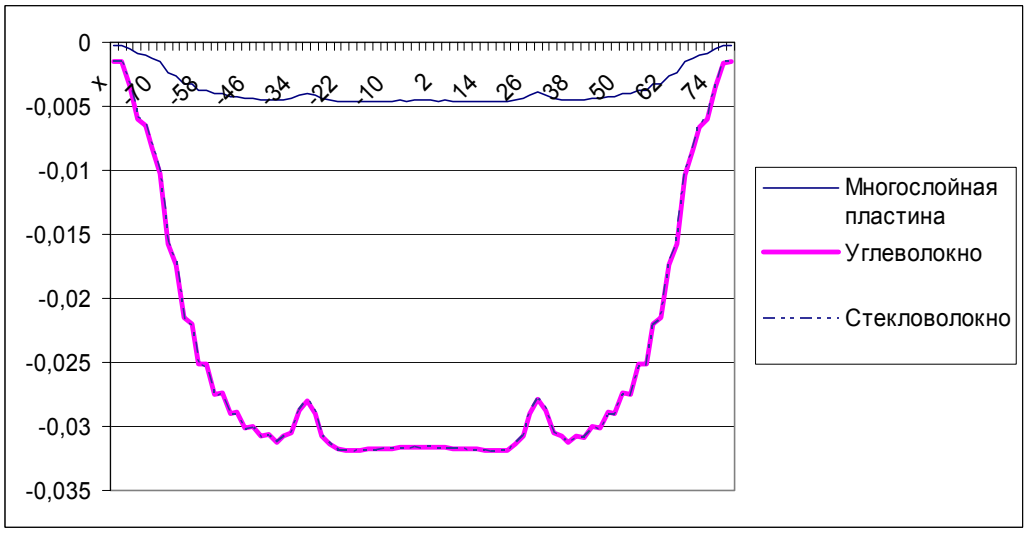


Рис. 15. Сравнительное распределение напряжений σ_x
для различных случаев материала ($y = 0$)

Полученные инструментальной системой FORTU результаты качественно совпадают с результатами, полученными в работе [3]. Следует отметить, что проблемно-ориентированный язык FORTU-2 и построенная на его базе инструментальная система FORTU, легко позволяют описывать расчетные схемы как с использованием микро- и макроподходов, так и с использованием комбинированной на их базе схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бувайло Д.П., Гоменюк С.І., Толок В.О. FORTU – мова опису схем розв'язання задач математичної фізики // Вісник ЗДУ. – 2000. №1. – С. 19-25.

2. Гоменюк С.І., Морозов Д.Н., Толок В.О. Опыт применения инструментальных систем для численного анализа задач механики // Вісник ЗДУ. – 2001. №2. – С. 22-27.

3. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Мир, 1982. – 232 с.