УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

Е. А. Кушнеров, асп.

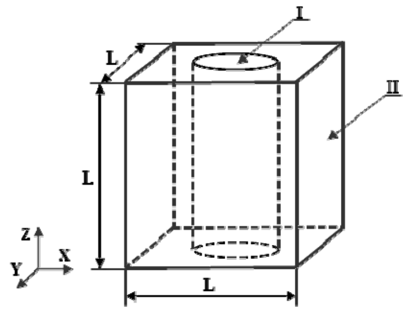
ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

1. Введение. В настоящее время во многих отраслях промышленности широко используются композитные материалы, состоящие из нескольких компонентов с различными физико-механическими характеристиками. Как правило, свойства композитов значительно превосходят свойства обычных однородных материалов. Так, высокая прочность и жесткость могут сочетаться с небольшим объемным весом, повышенной стойкостью к воздействию агрессивных сред, пр. Распространенным методом расчета композитов является приближенная замена исходного неоднородного материала на эквивалентный ему однородный материал с некоторыми осредненными (т.н. эффективными) характеристиками.

Определение эффективных характеристик является одной из актуальных проблем современной механики композитов. Многие аналитические методы не обладают универсальностью и позволяют получить решение только для отдельных частных случаев [1, 2]. Данная работа посвящена численному определению эффективных модулей упругости волокнисто-армированного композитного материала [3]. Для этого используется метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе «Ansys» [4].

2. Методика численного моделирования. Рассматриваемый композитный материал состоит из матрицы и однонаправленных волокнистых включений. Включения расположены периодически в узлах квадратной решетки. При расчетах были приняты следующие свойства компонентов: волокна – сталь, модуль Юнга $E_1 = 210$ ГПа, плотность $\rho_1 = 7800$ кг/м^3, коэффициент Пуассона $\mu_1 = 0.28$; матрица – алюминий, $E_2 = 70$ ГПа, $\rho_2 = 2700$ кг/м^3, $\mu_2 = 0.32$. Объемная доля волокон c изменялась от 0.1 до 0.78. Отметим, что максимально возможное значение c, отвечающее случаю контакта соседних включений, равно $\pi/4 = 0.7853...$.

Для вычисления эффективных характеристик достаточно рассмотреть выделенный представительный элемент материала, которым является ячейка периодичности (рис.1). Ячейка периодичности представляет собой куб с длинной грани *L*. Здесь I – волокно, II – матрица. Инструментами ПК «Ansys» была построена модель ячейки периодичности, при этом использовался метод построения «снизу-вверх». Полученная модель дискретизировалась конечно-элементной сеткой (рис. 2). Использовались стандартные конечные элементы: Solid 186 (трехмерный квадратичный элемент с двадцатью узлами) для матрицы и Solid 187 (трехмерный квадратичный элемент с десятью узлами) для волокна. Количество конечных элементов варьировалось от 5500 до 6300 в зависимости от объемной доли волокна.



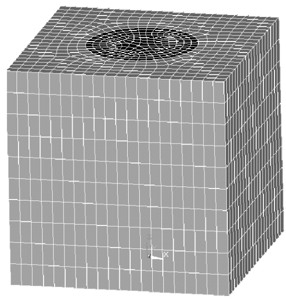


Рис. 1. Ячейка периодичности. **Рис. 2.** Конечно-элементная модель.

Рассматриваемый композитный материал является трансверсально-ортотропным. Его упругие свойства характеризуется шестью независимыми эффективными коэффициентами [5]: модули Юнга при продольном $E_L = E_z$ и поперечном $E_T = E_x = E_y$ растяжении-сжатии, модули сдвига в случае антиплоской $G_L = G_{xz} = G_{yz}$ и плоской $G_T = G_{xy}$ деформации; коэффициенты Пуассона при продольном $\mu_L = \mu_{zx} = \mu_{zy}$ и поперечном $\mu_T = \mu_{xy} = \mu_{yx}$ растяжении-сжатии, причем $\mu_{xz} = \mu_{yz} = \mu_L E_T / E_L$. Продольный модуль Юнга E_L с высокой степенью точности может быть определен по простому правилу смеси; численная оценка погрешности приведена в [2]. Среди остальных эффективных характеристик наиболее важными для практических расчетов являются поперечный модуль Юнга E_T и модули сдвига G_L , G_T .

Для определения модуля Юнга E_T использовалась модель нагружения, приведенная на рис. 3. На одной из граней ячейки ($x = 0$) задавалась жесткая заделка (перемещения всех точек поверхности грани равны нулю), а к противоположной грани ($x = L$) прикладывалась кинематическая нагрузка в виде перемещения u_x всех точек грани в направлении оси *x*. В образце возникали нормальные напряжения σ_x , все остальные компоненты напряжений равнялись нулю. Путем последовательных итераций, изменяя значение модуля Юнга в модели из эквивалентного однородного материала, добивались равенства общей энергии деформации композитного и однородного материалов при одинаковых перемещениях u_x . При выполнении этого условия, значение эффективного модуля E_T принималось равным соответствующему значению модуля Юнга эквивалентного материала.

Аналогичным образом определялись эффективные модули сдвига.

Для вычисления модуля G_T рассматривалась деформация чистого сдвига в плоскости xy под действием касательных напряжений τ_{xy}. На грани $x=0$ задавалась жесткая заделка, а к противоположной грани $x=L$ прикладывалась кинематическая нагрузка в виде перемещения в направлении оси y (рис. 4).

Для вычисления модуля G_L рассматривалась деформация чистого сдвига в плоскости xz. Жесткая заделка задавалась на грани $z=0$, а грань $z=L$ смещалась в направлении оси x под действием кинематической нагрузки (рис. 5). При этом в образце возникали только касательные напряжения τ_{xz}.

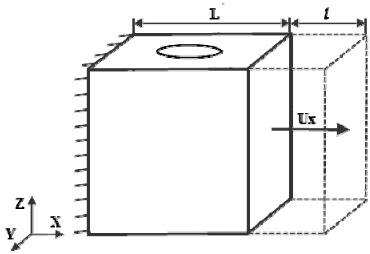


Рис. 3. Растяжение в направлении оси x.

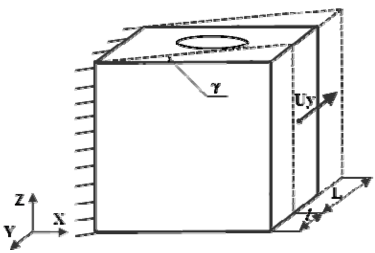


Рис. 4. Сдвиг в плоскости xy.

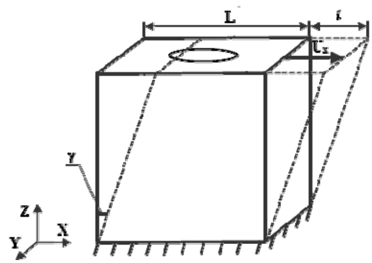


Рис. 5. Чистый сдвиг в плоскости xz.

3. Численные результаты. На рис. 6–8 приведены зависимости эффективных упругих модулей от объемной доли волокон c. Данные представлены в безразмерном виде и нормированы по отношению к свойствам матрицы. На рис. 6 $E^* = E_L / E_2$, на рис. 7 $G^* = G_T / G_2$, на рис. 8 $G^* = G_L / G_2$. Модуль сдвига изотропной матрицы равен $G_2 = E_2 / [2(1+\mu_2)]$.

Результаты численных расчетов в программном комплексе «Ansys» сравниваются с приближенными аналитическими решениями, полученными при помощи метода рядов Фурье [2, 6]. Во всех трех случаях разница не превышает 5%. Отметим, что аналитические решения дают заниженные значения эффективных модулей. Это может быть связано с недостаточным количеством удерживаемых членов разложений Фурье.

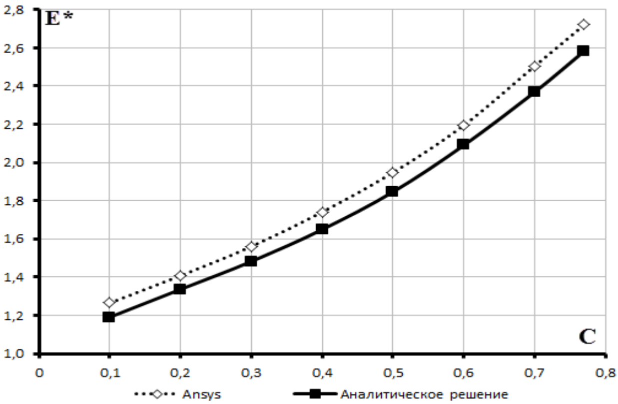


Рис. 6. Эффективный модуль Юнга E_T.

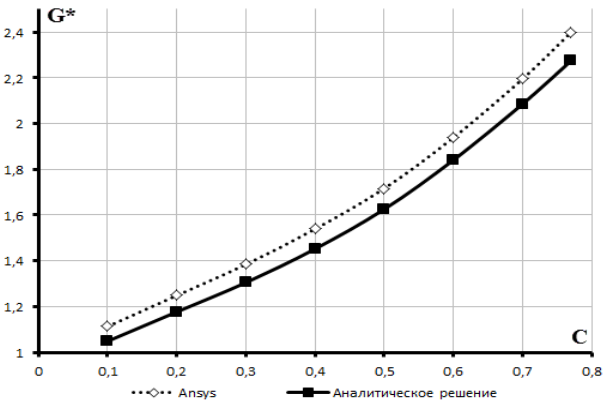


Рис. 7. Эффективный модуль сдвига G_T.

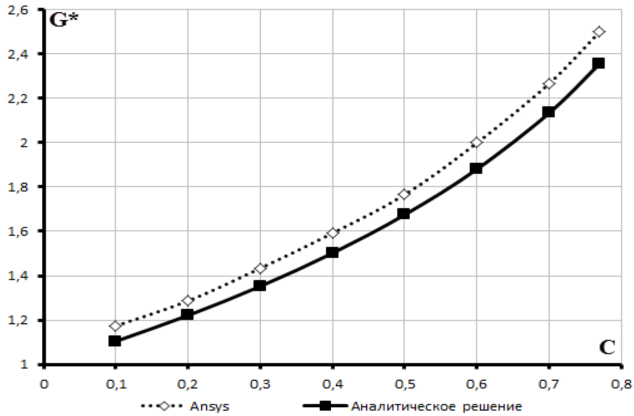


Рис. 8. Эффективный модуль сдвига G_L.

4. Выводы. В работе обоснована возможность применения программного комплекса «Ansys» для определения эффективных упругих характеристик микронеоднородных композитных материалов. Предложенный метод расчета основывается на приравнивании энергии деформации ячейки периодичности композитной структуры и энергии деформации эквивалентной однородной среды. Найдены эффективные модули упругости однонаправленного волокнисто-армированного композитного материала. Полученные численные результаты хорошо согласуются с известными аналитическими решениями.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке фонда им. Гумбольда, грант № 3.4-Fokoop-UKR/1070297.

Список использованных источников

1. Кристенсен Р.М. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 334 с.
2. Большаков В.И., Андрианов И.В., Данишевский В.В. Асимптотические методы расчета композитных материалов с учетом внутренней структуры. – Днепропетровск: «Пороги», 2008. – 196 с.
3. Павлов В.П., Нусратуллин Э.М., Филиппов А.А. Методика определения упругих характеристик гибридного композиционного материала и оценка ее точности // Известия КГАСУ. – 2012. – № 3 (21). – С. 167 – 174.
4. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах. – Москва: «Компьютер-Пресс», 2002. – 224 с.
5. Головчан В.Т. Анизотропия физико-механических свойств композитных материалов. – К.: Наукова думка, 1987. – 304 с.
6. Andrianov I., Danishevs’kyy V., Kushnerov I. Spatial localization of linear waves in 1D and 2D composite materials // ZAAM. – 2013, in press.