

УДК 539.3

Д.Алеман-Меза (асп., каф. МиПУ), А.А.Михайлов, асс., А.И.Боровков, к.т.н., проф.

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Цель работы – многовариантное исследование влияния объёмной концентрации  $v^f$  и относительной жесткости волокон (соотношения модулей упругости матрицы  $E_m$  и волокна  $E_f$ ) на эффективные упругие характеристики однонаправленных волокнистых композитов с двоякопериодической структурой.

Рассмотрим однонаправленный волокнистый упругий композит с двоякопериодической структурой, компоненты которого идеально связаны между собой. Представительный элемент объема (ячейка периодичности) рассматриваемой микронеоднородной среды приведен на рис. 1. Гетерогенная среда состоит из двух компонентов – матрицы  $m$  и включений  $f$ . Объёмную концентрацию волокон  $v^f$  изменяем следующим образом:

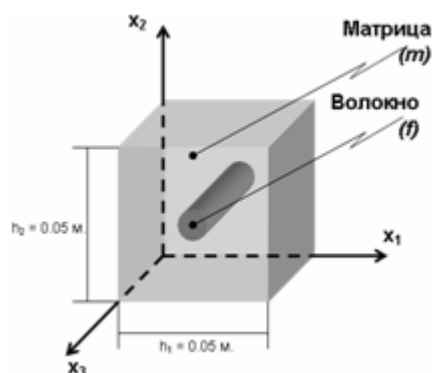


Рис. 1

$$v^f = \left\{ (0.1), (0.2), (0.3), (0.4), (0.5), (0.6), \left(0.95 \frac{\pi}{4}\right) \right\}.$$

Упругие свойства матрицы фиксированы. Соотношение модулей Юнга материалов волокон  $E_f$  и матрицы  $E_m$  принимает следующие значения:

$$\frac{E_f}{E_m} = \left\{ 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 10, 10^2, 10^3, 10^4 \right\}.$$

Сравним четыре различных подхода для вычисления эффективных упругих характеристик: классическое осреднение по Фойгту – Рейсу [1]; способ В.Л.Бидермана [2], где композит рассматривается как однородный материал с анизотропными свойствами, а каждый слой моделируется в виде многослойной пластинки; подход Л.П.Хорошуна и Б.П.Маслова [3], где волокнистые композиты армированы хаотически расположенными непрерывными волокнами; а также метод прямой гомогенизации (МПГ) на основе кинематико-статических граничных условий, задаваемых для ячейки периодичности [4].

Для эффективного осуществления многовариантных КЭ исследований разработан алгоритм и написана программа на языке *APDL (ANSYS Parametric Design Language)*. В силу симметрии задачи рассмотрена  $\frac{1}{4}$  часть ячейки периодичности, приведенной на рис. 1.

Сравнивая значения эффективного модуля Юнга  $E^*_1$ , вычисленные на основе четырех подходов при различных соотношениях модулей упругости волокна и матрицы для различных объёмных концентраций волокон (рис. 2), и, наоборот, при различных объёмных концентрациях волокон для различных соотношений модулей упругости волокна и матрицы (рис. 3). Необходимо подчеркнуть, что зависимость эффективных модулей сдвига  $G^*_{12}$  и  $G^*_{23}$  аналогична зависимости  $E^*_1$ .

Из приведённых выше графиков видно, что при  $E_f / E_m < 1$  разница результатов, полученных на основе четырёх подходов, крайне незначительна, а при  $E_f / E_m > 1$  результаты существенно различаются. Таким образом, чем выше объёмная концентрация, тем больше отличие результатов.

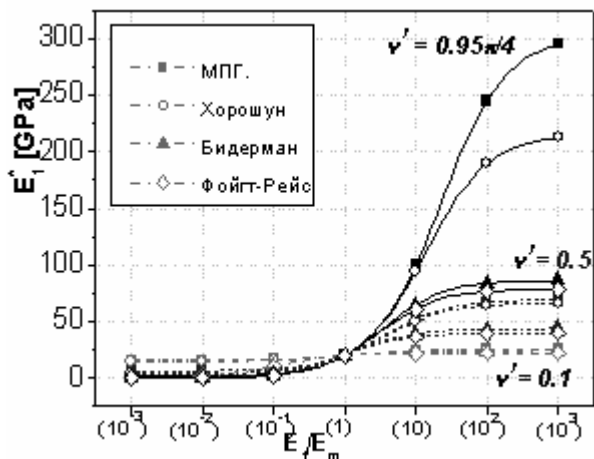


Рис. 2

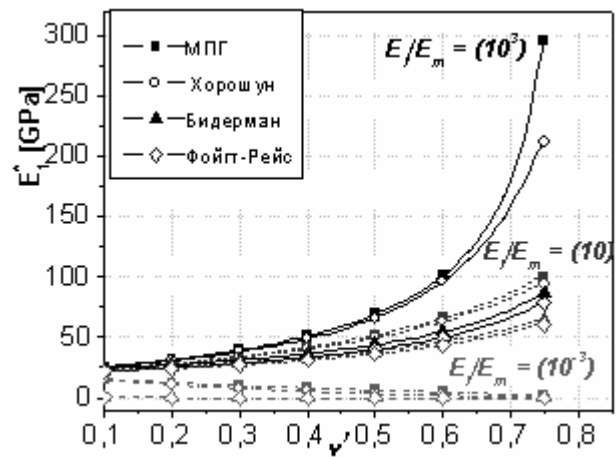


Рис. 3

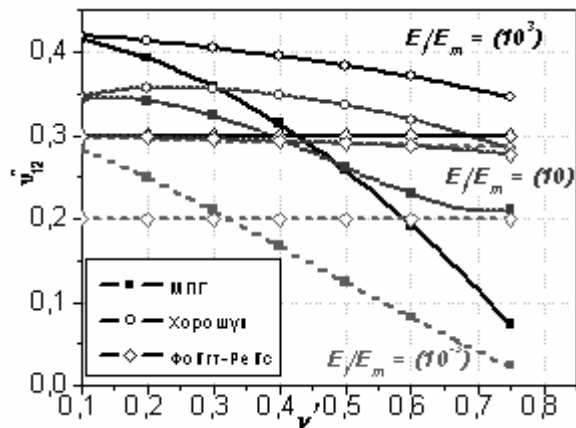


Рис. 4

Исследование сходимости подходов для определения эффективного коэффициента Пуассона  $\nu_{12}^*$  показывает, что подходы Л.Хорошуна и В.Болотина как при увеличении объёмной концентрации, так и при увеличении соотношения  $E_f/E_m$  дают близкие результаты, тогда как метод прямой гомогенизации даёт принципиально иные результаты. Отметим также значительное изменение  $\nu_{12}^*$  при увеличении объёмной концентрации.

Выполненные многовариантные КЭ исследования и детальное сравнение методов прямой гомогенизации и асимптотического усреднения Бахвалова – Победри [5,6] позволяют сделать вывод, что метод прямой гомогенизации более точно отражает изменения эффективных упругих характеристик, чем другие рассмотренные в настоящей работе подходы.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций – М.: Машиностроение, 1980.
2. Прочность, устойчивость, колебания. Т. 2 / Под общ. ред. И.А.Биргера, Я.Г.Пановко – М.: Машиностроение, 1968.
3. Механика композиционных материалов и элементов конструкций. Т. 1. Механика материалов / Под общ. ред. Л.П.Хорошуна – Киев: Наукова Думка, 1982.
4. Боровков А.И. Эффективные физико-механические свойства волокнистых композитов. – М.: Изд-во ВИНТИ. 1985. 113 с.
5. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. Математические задачи механики композиционных материалов. – М.: Наука, 1984.
6. Боровков А.И., Клыш А.Е. Сравнительный анализ метода асимптотического осреднения и метода прямой гомогенизации в задачах определения эффективных характеристик волокнистых композитов // “Механика симметричных неоднородных сред и ее приложения”. Одесса. Украина. 1997. с. 31-37.