

УДК 539.3

И.В.Комарова (5 курс, каф. МПУ), Д.В.Шевченко, асс., А.И.Боровков, к.т.н., проф.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕДЕФОРМИРУЕМОГО ШТАМПА И ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

Работа посвящена исследованию контактного взаимодействия жесткого прямоугольного в плане штампа и композитной среды – однонаправленного волокнистого композита тетрагональной структуры (рис. 1, 2). Прежде всего, на основе метода прямой гомогенизации [1] были определены эффективные упругие характеристики композитной структуры, а затем были рассмотрены различные гибридные *Номо-Нет*-модели [2] (рис. 2), обладающие реальными гетерогенными свойствами в области контакта со штампом и вычисленными эффективными гомогенными упругими свойствами в зонах, удаленных от штампа. Особое внимание в работе уделено детальному исследованию микронапряженного состояния в области контактного взаимодействия жесткого штампа и композитной среды на основе метода последовательной гетерогенизации [2] (рис. 2) эффективной гомогенной среды путем последовательного увеличения в гибридных *Номо-Нет*-моделях числа гетерогенных ячеек. Итак, многомодельное конечно-элементное (КЭ) исследование состоит из следующих основных этапов:

1. КЭ исследование контактного взаимодействия жесткого штампа и однонаправленного волокнистого композита тетрагональной структуры (рис. 2). В композит вдавливается жесткий прямоугольный в плане штамп (модуль Юнга материала штампа – $E = 210 \cdot 10^3$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.30$). На жесткий штамп действует равномерно распределенное давление $p = 1$ МПа. КЭ модель композитной структуры содержит 1 182 402 степеней свободы. Учитывая результаты практической сходимости КЭ решений, примем решение этой задачи в качестве *эталонного решения*.
2. КЭ определение эффективных упругих характеристик волокнистого композита на основе метода прямой гомогенизации [1] – вычисление эффективных модулей Юнга, коэффициентов Пуассона и модулей сдвига. Ячейка периодичности (рис. 1; диаметр волокна – $d = 35$ мкм, высота – $2h = 43$ мкм) состоит из двух компонентов, имеющих упругие свойства: 1 – медь (модуль Юнга – $E = 120$ ГПа, коэффициент Пуассона – $\nu = 0.3$, модуль сдвига – $G = 46.1$ ГПа), 2 – ортотропная изоляция (модули Юнга: $E_1 = 36$ ГПа, $E_2 = 22$ ГПа, $E_3 = 29$ ГПа, коэффициенты Пуассона: $\nu_{12} = 0.2$, $\nu_{23} = 0.1$, $\nu_{31} = 0.1$; модуль сдвига – $G = 11$ ГПа).
3. КЭ решение задачи о контактном взаимодействии жесткого штампа и гомогенной среды, обладающей вычисленными эффективными упругими свойствами композиционного материала. КЭ модель эффективной среды содержит всего 73 284 степеней свободы.
4. КЭ решение серии задач о контактном взаимодействии жесткого штампа с гибридными *Номо-Нет*-моделями композитной среды, каждая из которых содержит гетерогенизированную область с одним, двумя или тремя слоями микронеоднородных ячеек периодичности, расположенных в области контактного взаимодействия. КЭ модели содержат, соответственно, 128 972, 175 634 и 241 000 степеней свободы.

Геометрические размеры жесткого штампа, реальной композитной среды в эталонной задаче, эффективной гомогенной среды и гибридных *Номо-Нет*-сред, а также величина приложенного давления одинаковы во всех задачах (рис. 2). Во всех задачах о контактном

взаимодействии между жестким штампом и гетерогенной/гомогенной/гибридной средой отсутствует трение. В результате КЭ решения каждой из этих задач были получены поля компонентов вектора перемещения, компонентов тензора напряжений и распределение контактного давления.

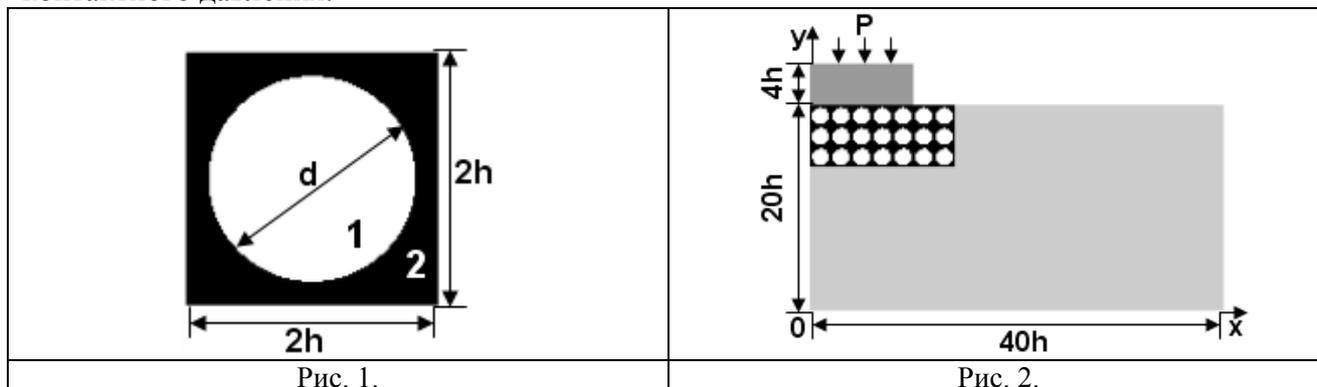


Рис. 1.

Рис. 2.

По результатам КЭ решения задач о контактом взаимодействии был проведен анализ графических результатов для всех рассмотренных задач. В частности, на рис. 3 представлены зависимости компонента тензора напряжения σ_y от y -координаты ($x = 0$ на рис. 2) для гетерогенной среды (эталонная задача), для задачи с эффективной гомогенной средой и для гибридных *Homo-Het*-моделей с одним, двумя и тремя слоями гетерогенных ячеек периодичности.

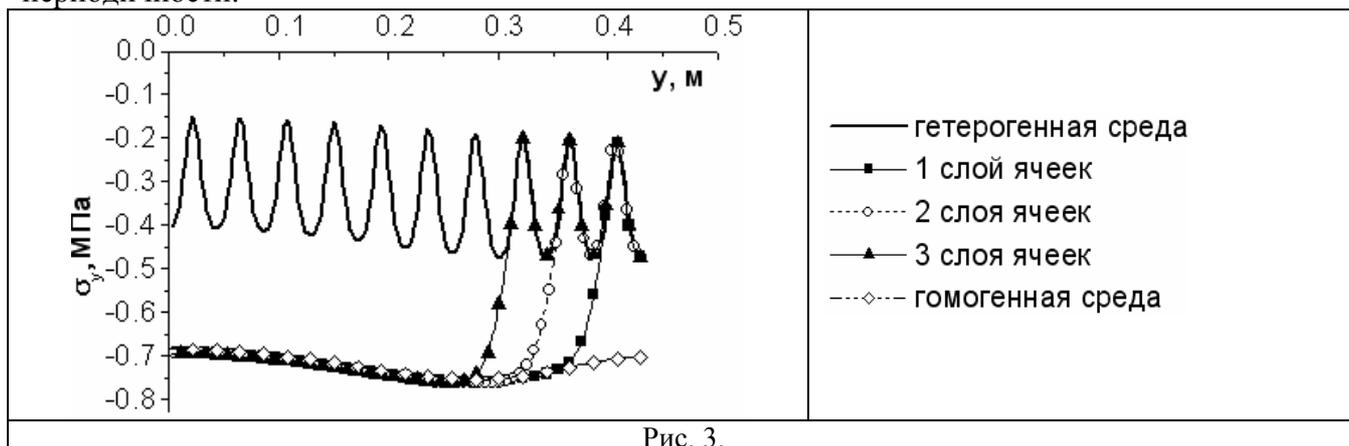


Рис. 3.

Из рис. 3 следует, что процедура последовательной гетерогенизации позволяет получать решения, которые совпадают в зоне гетерогенизации с эталонным решением, полученным с помощью КЭ модели композитной структуры, содержащей 1 182 402 степени свободы. Итак, поля микронапряжений в зоне контактного взаимодействия жесткого штампа и композитной среды с высокой степенью точности получены для *Homo-Het*-модели с одним слоем гетерогенных ячеек периодичности, причем эта модель содержит всего лишь 128 972 степени свободы, что почти в 10 раз меньше числа степеней свободы в эталонной задаче.

Представляется достаточно очевидным, что изложенный подход легко может быть обобщен на принципиально более сложные задачи – задачи о множественном контактом взаимодействии деформируемых композитных сред с различной микроструктурой.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Боровков А.И. Эффективные физико-механические свойства волокнистых композитов – М.: Изд-во ВИНТИ. 1985. 113 с.
2. Borovkov A.I., Palmov V.A. Locality Principle in Mechanics of Composite Structures // Preprints 3rd Int. Workshop “Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering” (NDTCS'99). St.Petersburg, Russia. 1999. H6-H7.

