

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАПОЛНЕННОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Загородников Р.А., Анисимов И.И., Щемелинин А.В.

АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, Россия, zag22@ya.ru

В настоящее время применительно к решению задач создания и оптимизации механических характеристик изделий ракетно-космической техники (РКТ) активизировались разработки численных методов моделирования процессов деформирования и разрушения в структуре высокоэнергетических наполненных полимерных материалов [1] (ВНПМ). Основное внимание при этом ориентируется на сокращение объемов, длительности и стоимостных показателей многофакторных лабораторных экспериментов, в которых варьируются различные параметры структуры наполнителя с целью улучшения механических характеристик ВНПМ. Реальная структура ВНПМ (рисунок 1), состоящая из полимерной матрицы и мелкодисперсного наполнителя, заменяется расчетной моделью, которая должна адекватно отражать закономерности деформирования материала натурального изделия при воздействии различных силовых и температурных нагрузок.

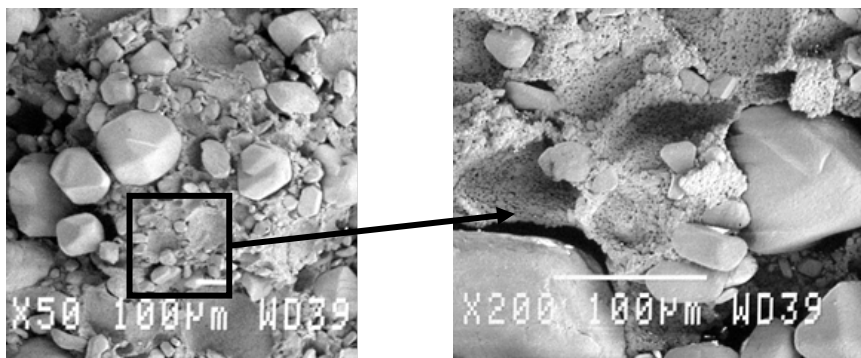


Рисунок 1 – Реальная структура ВНПМ (степень наполнения $\phi=75-85\%$)

Формирование расчетной модели – ключевой элемент технологии решения задачи оптимизации структуры и свойств ВНПМ. Современные подходы к моделированию структуры таких материалов в большинстве случаев базируются на использовании «плоских» моделей, в которых реализуются условия плоского деформированного или плоского напряженного состояния. Однако используемые в материалах изделий РКТ частицы наполнителя имеют пространственную (сферическую, эллиптическую, многогранную и т. п.) форму (рисунок 1). Моделирование структуры и напряженного состояния в объеме таких материалов предопределяет необходимость использования пространственных моделей, позволяющих отразить не только параметры и схему расположения наполнителя, но и особенности процессов взаимодействия частиц, скрепленных с полимерной матрицей (ПМ) [2].

К разрабатываемой модели предъявляются требования адекватности реальному ВНПМ по:

- концентрации, фракционности и форме наполнителя;
- условиям контакта на границе «наполнитель – ПМ» в процессе силового нагружения (деформирования) ВНПМ;
- жесткостным характеристикам наполнителя и ПМ;
- закономерностям развития объемных изменений $(\Delta V/V_0)$ в процессе одноосного растяжения ВНПМ.

Механическое поведение ПМ (полимерной матрицы) моделировалось упругой моделью механического состояния, наполнитель принимался абсолютно жестким. Параметры упругой модели ПМ определялись экспериментально.

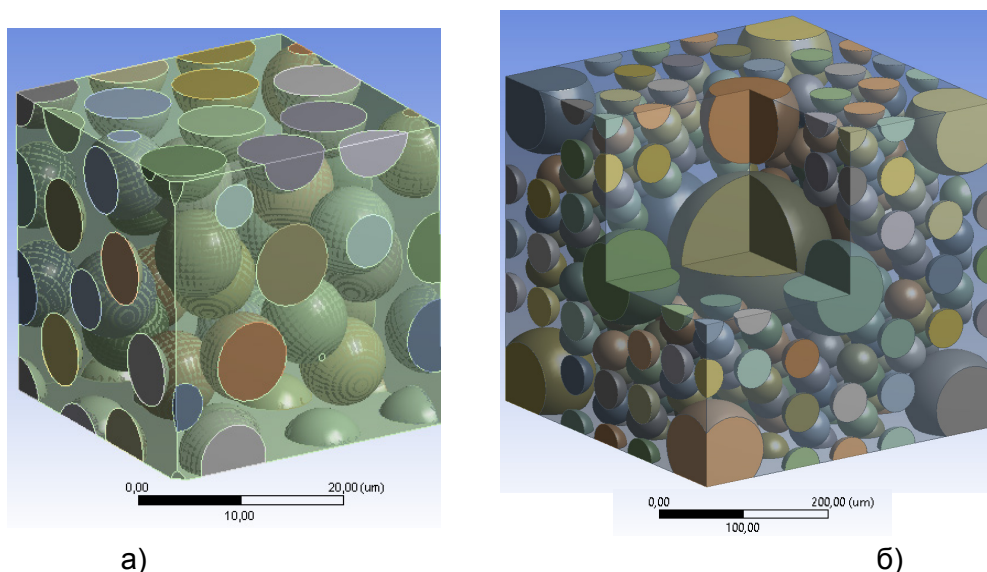


Рисунок 2 – Размерные уровни модели многофракционной структуры ВНПМ наполненного композита: а) I уровень ($\phi=25-30\%$); б) II уровень ($\phi=75-80\%$).

В соответствии с современными технологиями [3, 4], для реализации высокого уровня ($\phi=75-80\%$) заполнения ПМ наполнителем предусматривалось использование двухуровневых расчетных схем.

Первый уровень (рисунок 2, а) модели ВНПМ – одна мелкозернистая (5 мкм) фракция частиц наполнителя, которые скреплены с ПМ, объемное наполнение 25-30%. Параметры механического состояния ПМ ($E_{св}^{(1)}$, $\mu_{св}^{(1)}$) адекватно отражают характеристики реальной ПМ.

По результатам расчета кривой растяжения $\sigma=f(\epsilon)$ модели I уровня определяются параметры механического состояния модели ($E_{эф}^{(1)}$, $\mu_{эф}^{(1)}$), которые в дальнейшем используются в качестве характеристики связующего (ПМ) модели II уровня ($E_{пм}^{(II)} = E_{эф}^{(1)}$, $\mu_{пм}^{(II)} = \mu_{эф}^{(1)}$).

Второй уровень (рисунок 2, б) модели ВНПМ – три крупнозернистые фракции наполнителя, ($\phi=50, 120, 200$ мкм). Суммарное объемное наполнение двух уровней соответствует реальному ВНПМ ($\phi=80\%$).

При расчете напряженного состояния в модели ВНПМ II уровня введено условие реализации отслоений наполнителя по достижении определенного уровня напряжений на границе «наполнитель-ПМ» во время деформирования (рисунок 3). Это позволило отразить экспериментально регистрируемые эффекты физической нелинейности исследуемого материала при деформировании.

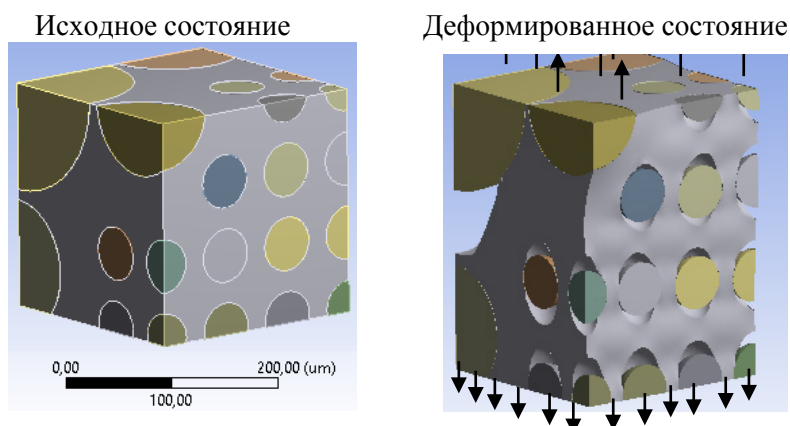


Рисунок 3 – Реализация отслоения наполнителя от связующего в структуре расчетной модели при растяжении

С целью верификации полученных результатов расчета была построена диаграмма деформирования $\sigma=f(\varepsilon)$ для реализованной модели, которая довольно хорошо сходится с экспериментальными данными (рисунок 4).

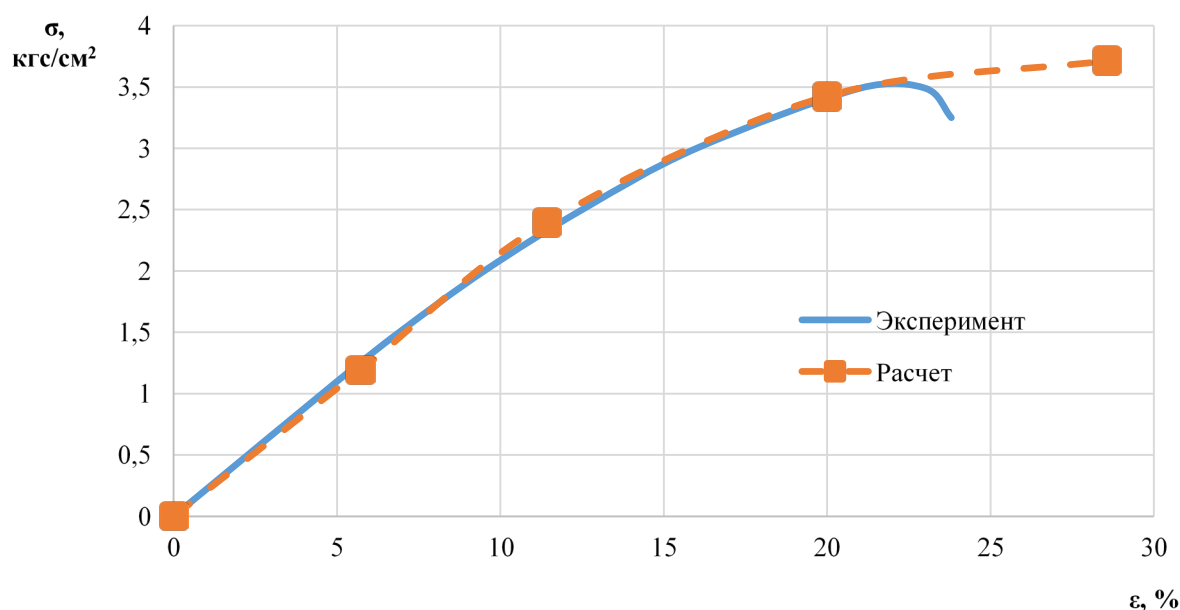


Рисунок 4 – Расчетная и экспериментальная диаграммы деформирования ВНПМ в режиме растяжения $\dot{\varepsilon}=10^{-3} \text{ с}^{-1}$

Выводы

- Сформулированы принципы построения расчетной модели материалов изделий РКТ, позволяющие оптимизировать параметры структурного состояния многофракционного наполнителя из условий моделирования механического поведения ВНПМ;
- Проведен трехмерный расчет модели серийно изготавливаемого ВНПМ. Полученные расчетные данные согласуются с экспериментом;
- Предложенная модель структуры ВНПМ позволяет выявить факторы структуры, оказывающие приоритетное влияние на механические характеристики наполненной композиции.

Литература

1. Banerjee B., Micromechanics-based prediction of thermoelastic properties of high energy materials // A dissertation submitted to the faculty of the University of Utah in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Department of Mechanical Engineering, The University of Utah, December 2002.
2. Жарков А. С., Анисимов И. И., Щемелинин А. В., Бочкарева С.А., Люкшин Б. А., Загородников Р. А. Исследование напряженно-деформированного состояния в структуре наполненного полимерного композита с использованием объемных моделей. // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012.– №1.
3. Липанов А.М. Теоретические основы отработки твердых ракетных топлив. / Технич. редактор Е.Г. Вершинина. – Ижевск: Изд-во ин-та прикладной механики УрО РАН, 2003.
4. Компьютерное конструирование наполненных полимерных композиций/Б.А. Люкшин, С.В. Панин, С.А. Бочкарева, П.А. Люкшин и др. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007.