

Моделирование упруго-пластических деформаций на уровне микроструктуры с использованием систем параллельных вычислений

А.В. Белевич, А.В. Аборкин

Владимирский государственный университет
aborckin@vlsu.ru

При математическом моделировании процессов деформирования композитов актуальным является развитие исследований, в которых материал рассматривается как микронеоднородная среда [1, 2].

Цель данной работы состоит в разработке компьютерной модели и изучении локализации пластических деформаций на микро уровне структурно неоднородных материалов под действием механических нагрузок.

До недавнего времени проведение таких исследований было осложнено высокой трудоемкостью вычислительных процедур, не позволяющих достаточно подробно проанализировать упруго-пластические деформации на уровне структуры. Решение данной проблемы стало возможным благодаря использованию при проведении расчетов высокопроизводительных кластерных систем, позволяющих проводить параллельные вычисления.

В данной работе при моделировании напряженного состояния гетерогенных материалов развивается структурно-феноменологический подход. Он заключается в том, что общепринятые в механике деформируемого твердого тела феноменологические уравнения и критерии рассматриваются на нескольких, в частности — двух уровнях: микроскопическом (структурном), связанном с элементами структуры композита, и макроскопическом, отражающем поведение композиционного материала как однородного с эффективными свойствами. Связь между физическими величинами, установленная в рамках указанного подхода, определяет структурно-феноменологическую модель.

В качестве объекта исследования выбран фрагмент подшипника скольжения из сплава $A99+8\%Al_3Ti$, с размерами $L=0,15$ мм, $l=0,3$ мм, $D=40$ мм, $d=20$ мм (см. рис. 1).

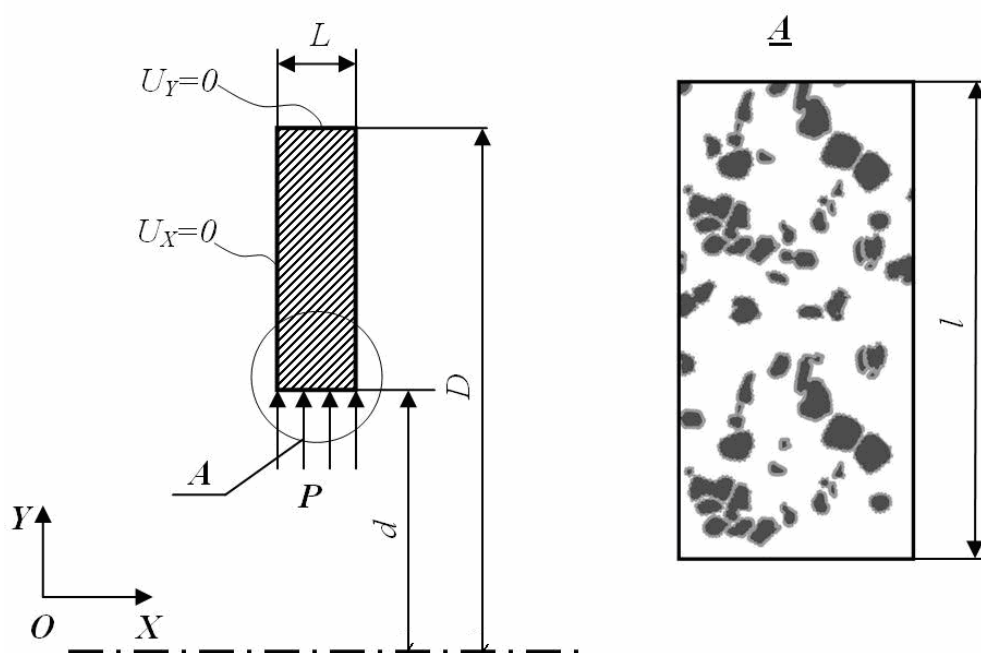


Рисунок 1. Схема к расчету напряжений в подшипнике скольжения.

Сплав рассматривается как двухкомпонентный материал, состоящий из однородного материала матрицы(алюминий) с включением алюминида титана с толщиной слоя 300 мкм (см. рис. 1).

При построении модели учитывали, что область V с границей S содержит в себе множество непересекающихся областей w_k , ограниченных поверхностями S_k . Для двухкомпонентных композитов часть $V_1 = \sum w_k$ области заполнена однородным в пределах w_k материалом со свойствами $F_{ij}^{(1)}$ (армирующая фаза), а оставшаяся часть области $V_2 = V - V_1$ — однородным материалом со свойствами $F_{ij}^{(2)}$ (матрица) Многосвязная поверхность $S_{12} = \sum S_k$ есть межфазная поверхность, разделяющая структурные элементы композита (см. рис. 2а). На данной поверхности выполняется условиями непрерывности перемещений.

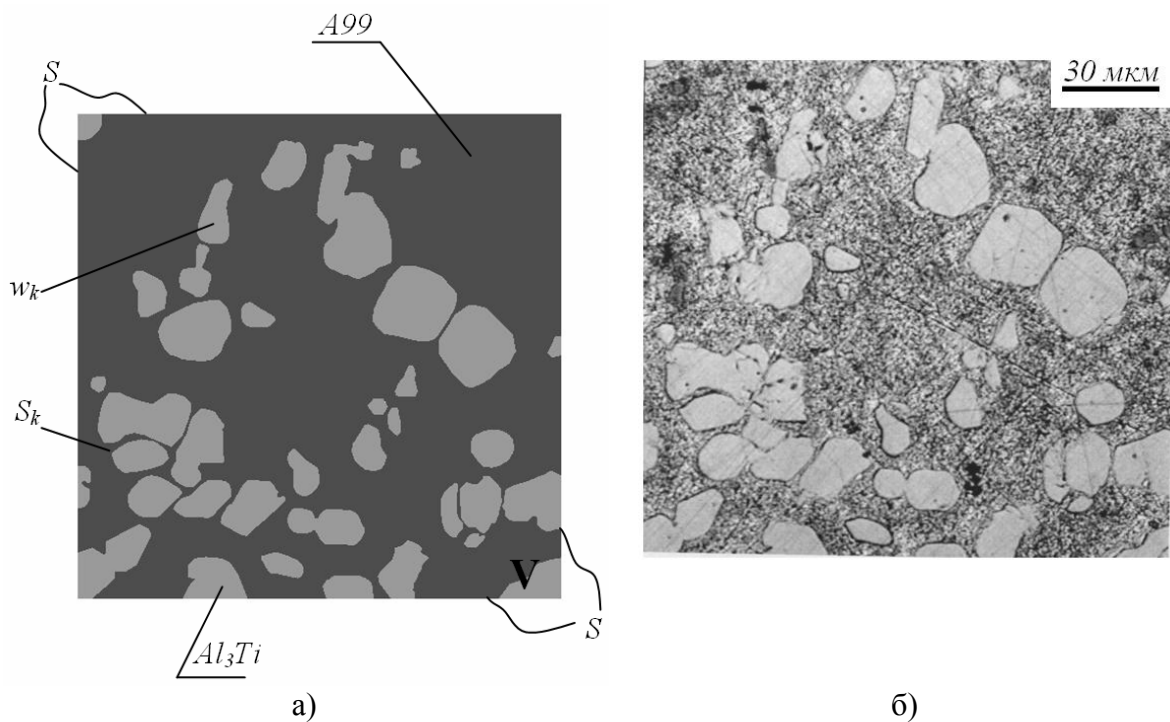


Рисунок 2. Геометрическая модель гетерогенной зоны(а); структура сплава A99+8%Al₃Ti.

Размер и расположение зерен соответствовало реальной структуре данного сплава приведенной на рис.2б. Размер зерен Al_3Ti изменяется в диапазоне 6 - 20мкм.

Физико-механические свойства материала армирующей фазы соответствовали Al_3Ti , матрица соответствовала – A99.

Модель механики микронеоднородной среды, основана на допущениях, приведенных в работе [3].

Это позволило считать, что все уравнения и критерии, относящиеся к однородным материалам, пригодны для описания поведения композитов на структурном уровне. Тогда структурные (или микро-) напряжения при заданных массовых силах X удовлетворяют уравнениям равновесия:

$$\sigma_{ij,j}(r) + X_j(r) = 0, \quad (1)$$

а тензор структурных деформаций связан с вектором структурных перемещений соотношениями Коши:

$$\varepsilon_{ij}(r) = \frac{1}{2} [u_{i,j}(r) + u_{j,i}(r)] \quad (2)$$

На границе раздела S_k необходимо в такой ситуации сформулировать условия контакта составляющих. Условия идеального контакта, например, сводятся к требованиям отсутствия внешних поверхностных усилий и непрерывности перемещений на границе раздела:

$$[\sigma_{ij}^{(\varepsilon)} n_j] = 0, \quad [u_i^{(\varepsilon)}] = 0 \quad (3)$$

Расчеты выполнены для схемы нагружения, представленной на рис. 1. При проведении расчетов величина давления P изменялась в диапазоне 50-80 МПа. Выбранный диапазон соответствует переходу матрицы исследуемого сплава в пластическое состояние.

Материалу матрицы соответствует модель упруго-пластической среды с нелинейным упрочнением.

Зернам Al_3Ti соответствовала упругая модель деформирования, так как они имеют предел текучести в 10 раз выше материала матрицы.

Вычисление напряжений выполняли с применением алгоритмов метода конечных элементов, реализованных в программном комплексе ANSYS. Для проведения расчетов использовали академическую версию ANSYS с возможностью распараллеливания процесса вычислений на 6 узлов кластера.

При вычислении параметров напряженно-деформированного состояния принята гипотеза об осевой симметрии, что позволило рассматривать задачу как двумерную.

Разбиение расчетной области проводилось 8 узловыми конечными элементами, со сгущением сетки в области армирующих фаз. Конечно-элементная модель включала 4160576 узлов и 1379294 элементов, минимальный размер конечного элемента составил 0,5 мкм.

В результате расчета получены базы данных содержащие информацию о распределении и величине параметров напряженно-деформированного состояния на микро и макро уровнях в зависимости от величины давления.

На рис. 3а приведена картина распределения гидростатического напряжения на микро уровне при $P=60$ МПа. В материале матрицы величина гидростатического напряжения изменяется в диапазоне от -15 МПа до -61 МПа, максимальные значения достигаются в межзеренном пространстве, в местах концентрации армирующих фаз.

Полученные значения σ_y во всей расчетной области сжимающие, их величина изменяется в диапазоне от -36 МПа до -64 МПа, распределение величины σ_x является знакопеременным с диапазоном изменения от -42 МПа до 73 МПа.

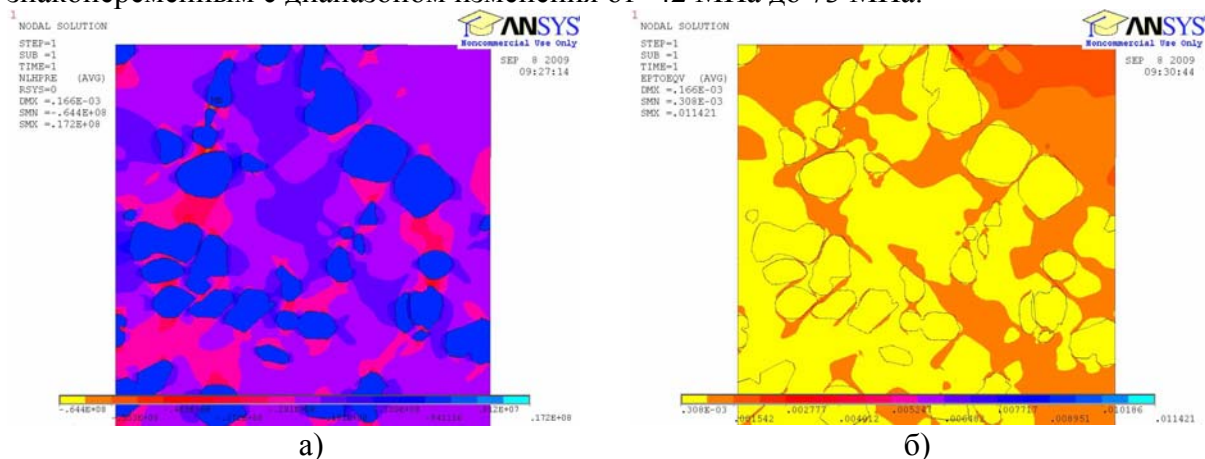


Рисунок 3. Расчетные картины распределения:

а) - гидростатического напряжения; б) - эквивалентной деформации.

На рис. 3б представлено распределение расчетных значений эквивалентной деформации. Максимальные значения эквивалентной деформации, порядка 0,001, наблюдаются на границе зерно-связка в материале матрицы или в местах концентрации зерен, где межзеренное пространство составляет 1-4 мкм. Данные зоны также соответствуют очагам пластической деформации.

В настоящее время авторы проводят исследования направленные на изучение зависимости локализации пластических деформаций на микро уровне от параметров структуры неоднородных материалов на основе алюминия.

Вывод. На основе структурно-феноменологического подхода разработана компьютерная модель подшипника скольжения из сплава A99+8%Al3Ti, учитывающая размер, форму и расположение зерен армирующих элементов. В результате расчета получены базы данных содержащие информацию о распределении и величине параметров напряженно-деформированного состояния на микро уровне структурно неоднородного материала, установлены зоны локализации пластических деформаций.

Литература

1. Кунин И.А. Теория упругих сред с микроструктурой.-М.: Наука, 1975.-415 с.
2. Шермергор Т.Д. Теория упругости микрон неоднородных сред.- М.: Наука, 1977.-400 с.
3. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. / Под ред. Ю.В. Соколкина. — М.: Наука. Физматлит, 1997. — 288 с.