

УДК 539.3

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

© 2011 г.

В.Н. Ашихмин, Г.А. Бастраков, М.В. Айтуганов, А.Ю. Яниц

Пермский государственный технический университет

awn@perm.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Предложена методика многоуровневого моделирования процессов обработки материалов давлением, реализованная в виде компьютерной модели. С помощью данной модели исследована эволюция текстуры и анизотропии упругих и пластических свойств в процессе прямого выдавливания медного прутка. Проведено сравнение с экспериментом.

Ключевые слова: механика сплошной среды, текстурообразование, теория пластичности, мезомеханика, физика твердого тела.

Решается важнейшая проблема создания физико-механических основ теории обработки материалов давлением, включая разработку теоретических подходов и моделей, позволяющих исследовать процессы глубокого пластического деформирования с учетом ротаций кристаллографических осей структурных элементов поликристаллов при их пластическом деформировании.

Предложена общая структура конститутивной модели макроуровня пластического деформирования поликристалла, включающая определяющие соотношения, эволюционные и замыкающие уравнения для внутренних переменных, описывающих микроструктуру поликристаллического материала.

Представлена трехуровневая модель, построенная на использовании моделей макро- (уровень изделия), мезо- (уровень зерна) и микроуровней (уровень кристаллической решетки) поликристаллического материала. При этом модели макро- и мезоуровней задействованы поочередно в итерационной процедуре. Модели микроуровня используются для проверки гипотез, используемых в модели мезоуровня. На макроуровне рассматривается собственно процесс обработки материала давлением в стационарной трехмерной постановке. Моделирование процесса проводится с использованием эйлерово-лагранжева подхода, то есть история нагружения каждой частицы материала прослеживается на эйлеровой сетке линий тока. Поля скоростей, скоростей деформаций, деформации и напряжения ищутся из решения краевой задачи, численная реализация которой построена на процедуре метода конечных элемен-

тов. Хотя предложенная методика может быть применена к нестационарным процессам, ее реализация в стационарной постановке в значительной степени снижает требования к используемым ресурсам вычислительной системы.

Рассмотрим более подробно особенности макромоделей. Параметрами процесса на макроуровне являются предписанные условия нагружения (краевые условия), которые и определяют эволюцию макронапряжений $\Sigma(t, L)$ и макродеформаций $E(t, L)$ и их скоростей. Определяющие соотношения макроуровня представляют собой, по существу, (анизотропный) закон Гука в скоростной (релаксационной) форме

$$\dot{\Sigma}^r = C : (\mathbf{D} - \mathbf{D}^p),$$

где Σ^r – не зависящая от выбора системы координат скорость тензора напряжений (коротационная производная \mathbf{r}), C – тензор модулей упругости, \mathbf{D} , \mathbf{D}^p – тензор деформации скорости и его пластическая составляющая. Пластическая составляющая деформации скорости \mathbf{D}^p и анизотропные упругие свойства C в каждый момент деформирования зависят от микроструктуры (а через нее – от истории нагружения), являясь явными внутренними переменными модели макроуровня. При одноуровневом подходе для данных параметров необходимо вводить дополнительные гипотезы и феноменологические эволюционные уравнения. Провести надежное обоснование этих гипотез и уравнений весьма сложно. При двухуровневом подходе каждой макроточке ставится в соответствие структурная модель, состоящая из мезоточек и вводятся правила взаимодействия макро- и мезоуровней. Параметры мезоточек (ориентаций

кристаллографической системы координат (КСК), сопротивление сдвигу, скорости и накопленные сдвиги по системам скольжения) выступают в качестве неявных внутренних переменных макро-модели.

В процессе пластического деформирования происходит разворот КСК материала зерен и формирование текстуры. Последнее приводит к возникновению анизотропии упругих и пластических свойств поликристалла, изменяющее, в свою очередь, макроскопическое напряженное и деформированное состояние исследуемого процесса.

Модель вращения КСК материала зерен построена на использовании в качестве движущей силы моментных напряжений, определяемых несовместностью сдвигов в соседних зернах. Через моментные напряжения и их скорости по соотношениям, сходным с соотношениями теории пластического течения, описывается поворот решетки.

При решении задачи на каждом шаге нагружения необходимо реализовать итерационную процедуру для обеспечения взаимосвязи моделей макро- и мезоуровней. Задавая начальным распределением макросвойств в момент времени t , с использованием макро-модели определим распределения скоростей макронапряжений и скоростей макродеформаций, макронапряжения и макродеформации на конец шага нагружения в момент времени $t + \Delta t$. Затем для каждой макроточки с использованием в качестве параметров нагружения макронапряжения или макродеформации, с применением модели мезоуровня определяются изменения ориентации КСК материала мезоточек и приращения необратимых деформаций в них.

По вычисленным ориентациям КСК мезоточек определяются новые эффективные упругие свойства макроточки, а по выборке необратимых деформаций в мезоточках – средние необратимые макродеформации макроточки. Далее происходит возврат к модели макроуровня и новое уточнение макронапряжений и макродеформаций. Итерационная процедура продолжается до сходимости по макропараметрам.

Как любая методика, двухуровневый подход имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам подхода можно отнести:

- возможность моделирования мезоструктуры поликристалла (распределение ориентаций КСК зерен, их размер и форму);
- моделирование макросвойств, существенно зависящих от мезоструктуры, в частности, анизотропию упругих, пластических и прочностных свойств;
- относительно простой вид определяющих

соотношений макроуровня (например анизотропный закон Гука в релаксационной форме $\Sigma^r = \mathbf{C} : (\mathbf{D} - \mathbf{D}^p)$);

- возможность распараллеливания вычислений;
- возможность решения существенно нелинейных задач.

Среди недостатков данного подхода можно отметить:

- невозможность получения аналитического решения задачи;
- большое количество неявных внутренних переменных для описания мезоуровня;
- большие запросы по ресурсам памяти и времени ЭВМ;
- высокая трудоемкость разработки программ для ЭВМ.

Можно заметить, что отмеченные недостатки имеют непринципиальный характер.

Разработан программный комплекс, реализующий двухуровневую (мезо- и макроуровень) модель упругопластического деформирования металлов и позволяющий для заданной программы макронагружения определить эволюцию и статистические характеристики упругих и пластических свойств, а также параметры структуры ГЦК металлов (ориентации кристаллической решетки зерен). Построенная модель пластического деформирования на мезоуровне учитывает внутризеренные сдвиги по системам скольжения и зернограничное скольжение, а также ротацию кристаллической решетки при различных схемах деформирования. Адекватность модели мезоуровня проверялась на одноосных опытах на растяжение, сжатие и простой сдвиг как моно-, так и поликристаллических материалов. В каждом случае получено удовлетворительное соответствие результатов данным натурных экспериментов.

На микроуровне проведено моделирование эволюции дислокационных скоплений под действием приложенной нагрузки как внутри зерен, так и вблизи их границ. Анализ полученных результатов позволил обосновать используемые гипотезы модели мезоуровня, в частности, об изотропном упрочнении.

С использованием разработанной модели исследованы процессы прямого выдавливания и волочения медного прутка круглого поперечного сечения. Исследовано влияние геометрических параметров инструмента на распределение и эволюцию получаемой аксиальной текстуры. Исследовано изменение текстуры, анизотропии упругих и пластических свойств как по радиусу прутка, так и в зависимости от геометрических характеристик волокна. Сравнение с экспериментом

показало удовлетворительное совпадение результатов. В частности, результаты моделирования показали, что при волочении получаемые текстуры близки к текстурам, получаемым при одноосном растяжении. Исследовано изменение

поверхности текучести поликристалла вдоль линии тока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-Урал, грант №10-08-96010.

USING MULTILEVEL MODELS FOR ANALYZING PROBLEMS OF PROCESSING MATERIALS BY PRESSURE

V.N. Ashikhmin, G.A. Bastrakov, M.V. Aytuganov, A.Yu. Yanz

A method of multilevel modeling of processing materials by pressure, implemented as a computer model, is presented. Using this model, the evolution of the texture and anisotropy of elastic and plastic properties in the process of direct extrusion of copper rod was analyzed. A comparison with experimental data is given.

Keywords: continuum mechanics, texture, theory of plasticity, mesomechanics, solid state physics.