

## ПРИМЕНИМОСТЬ ДВУХУРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СЛОЖНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА ПОЛИКРИСТАЛЛА

*Д.А. ЛОЕВЕЦ, П.С. ВОЛЕГОВ*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: Loevetsda@gmail.com

Описание поведения материалов при различных программах нагружения, в том числе – при нагружении по многозвенным траекториям и траекториям с изломами, является крайне важной задачей, как с точки зрения математического и физического описания соответствующих процессов, так и с точки зрения применения таких схем обработки на производстве, однако в связи с комплексностью и сложностью эта задача так и остается до конца не решенной. Сложность исследования обусловлена, в первую очередь, существенной неоднородностью процесса деформирования отдельных зерен в поликристаллическом теле, а также сопутствующими процессами упрочнения, разворотов (ротаций) кристаллических решеток, фрагментации и дробления зерен, формированием остаточных напряжений, накоплением микрповреждений и т.д. Таким образом, актуальной задачей представляется построение математических (и компьютерных) моделей, позволяющих корректно описывать процессы неупругого деформирования представительного объема поликристалла и эффекты, возникающие при интенсивных неупругих деформациях поликристаллов.

В рамках работы используется двухуровневая математическая модель (макро- и мезоуровни), описывающая неупругое деформирование поликристаллических тел [1]. В качестве модели мезоуровня принята упруговязкопластическая модель неупругого деформирования ГЦК-кристалла, при этом считается, что основной вклад в неупругое деформирование вносит скольжение дислокаций по системам скольжения; в качестве определяющего соотношения на каждом из масштабных уровней используется закон Гука в скоростной релаксационной форме. Напряжения на макроуровне в этом случае определяется осреднением напряжений в элементах мезоуровня – зернах. Подробная система уравнений, позволяющая описать поведение материала на мезо- и макроуровнях описана в работе [1].

Для сопоставления результатов численного моделирования и данных натурных экспериментов было использовано представление мер напряженного и деформированного состояния, предложенное в рамках теории упругопластических процессов А.А. Ильюшина [2]. Такое представление позволяет перейти от использования тензорных параметров напряженно-деформированного состояния к геометрически более прозрачному векторному представлению соответствующих величин.

В рамках работы проведена серия численных экспериментов, имитирующих неупругое деформирование представительного объема поликристаллов по сложным траекториям. Особое внимание уделено исследованию возможностей разработанной двухуровневой модели для описания эффекта запаздывания векторных свойств, который заключается в том, что при смене траектории деформирования представительного объема поликристалла вектор напряжений не совпадает с траекторией деформирования, а накладывается на нее с некоторым запаздыванием. Для оценки полученных результатов и проверки адекватности разработанной двухуровневой модели неупругого деформирования был проведен ряд численных экспериментов, имитирующих условия натурального эксперимента, результаты которого приведены в работе [3]. Для сравнения результатов выбрана схема деформирования по траектории в виде квадрата (в пространстве  $\mathcal{E}_1\text{--}\mathcal{E}_4$ ).

Ниже представлены траектории нагружения представительного объема поликристалла в пространстве напряжений  $S^5$  (проекция на плоскость  $S_1\text{--}S_4$ ) (рисунок 1) при деформировании по траектории «квадрат», а также зависимость угла наклона вектора напряжений к траектории деформирования (рисунок 2), позволяющие сравнить результаты моделирования с результатами численных и натуральных экспериментов, приведенных в работе [3]. На рисунках 1 и 2 наблюдается достаточно высокая степень качественного совпадения результатов численного моделирования и натурального эксперимента (причем степень совпадения

даже выше, чем в теоретической модели, предложенной авторами [3]), что подтверждает адекватность применяемой модели.

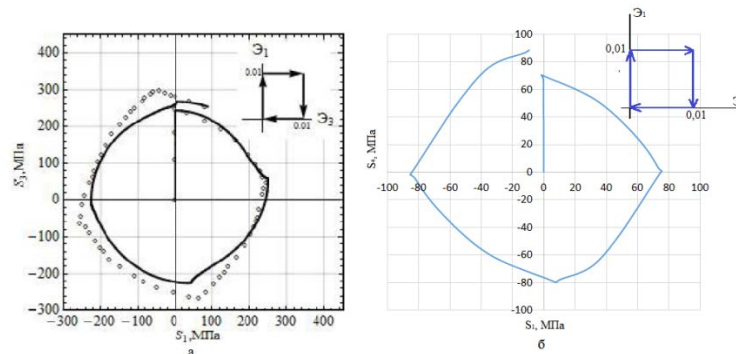


Рисунок 1 - Траектория нагружения представительного объема поликристалла в пространстве напряжений при нагружении по траектории деформирования в виде квадрата: а) сплошная линия – расчёт, точки – эксперимент [3]; б) расчёт с использованием двухуровневой модели неупругого деформирования

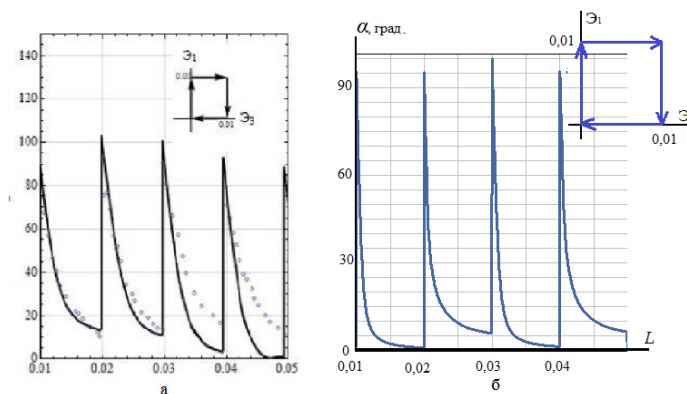


Рисунок 2 - Зависимость угла наклона вектора напряжений к касательной к траектории деформации от длины дуги накопленной деформации при нагружении по траектории деформации в виде квадрата: а) сплошная линия – расчёт, точки – эксперимент [3]; б) расчёт с использованием двухуровневой модели неупругого деформирования

Для количественного анализа необходимо подобрать параметры модельного материала таким образом, чтобы он совпадал с материалом, который подвергался деформированию в натуральных экспериментах. Из анализа рисунков 1 и 2 можно сделать вывод о возможности использования двухуровневой модели неупругого деформирования поликристаллов для описания эффекта запаздывания векторных свойств материала.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ №МК-1298.2017.1.*

### Список литературы

1. Трусов П.В., Волегов П.С., Кондратьев Н.С. Физические теории пластичности: учебное пособие. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 244 с.
2. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 273 с.
3. Темис Ю. М., Алхимов Д. А., Мартынова А. Д. Применение инвариантной теории пластического течения для моделирования процессов испытаний образцов при сложном упругопластическом деформировании // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – Т. 14, № 3. – Ч. 1. – С. 24-36.