

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ МЕХАНИКИ

(ДОКЛАДЫ IV ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ)

Томск, 5-7 октября 2004 г.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ РАКЕТНЫХ И АРТИЛЛЕРИЙСКИХ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ СОВЕТА ПО ГОРЕНИЮ И ВЗРЫВУ РАН
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ
МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ ПРИ ТОМСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ МЕХАНИКИ

(ДОКЛАДЫ IV ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ)

Томск, 5-7 октября 2004 г.



Издательство Томского университета
2004

УДК 523.44; 531.3; 532.546; 533.6; 539.3

ББК 22.251; 22.253; 22.62

Ф 947

Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады
Ф947 конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. 438 с.

ISBN 5-7511-1605-4

Сборник содержит материалы докладов Всероссийской конференции, посвященной фундаментальным и прикладным проблемам современной механики. Материалы сгруппированы в соответствии с работавшими на конференции секциями: пленарные доклады; 1) горение и химическая газодинамика; 2) механика деформируемого твердого тела; 3) газодинамика многофазных течений; 4) динамика полета и небесная механика; 5) тепломассообмен и гидроаэромеханика.

Для специалистов, работающих в перечисленных областях.

УДК 523.44; 531.3; 532.546; 533.6; 539.3

ББК 22.251; 22.253; 22.62

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Сопредседатели:

Богоряд И.Б. – профессор, директор НИИ ПММ при ТГУ

Морозов Н.Ф. – действительный член РАН, С-Петербургский университет

Ученый секретарь:

Жаровцев В.В. – снс, ученый секретарь НИИ ПММ

Члены оргкомитета:

Архипов В.А. – профессор, зав. отделом НИИ ПММ

Бартенев В.А. – профессор, зам. Генерального конструктора НПО «Прикладная механика им. М.Ф. Решетнева»

Бордовицына Т.В. – профессор, зав. отделом НИИ ПММ

Бутов В.Г. – профессор, зав. лабораторией НИИММ

Герасимов А.В. – профессор, зав. отделом НИИ ПММ

Глазунов А.А. – профессор, зав. отделом НИИ ПММ

Зинченко В.И. – профессор, зам. Главы Администрации Томской области

Исаков Г.Н. – д.т.н., зав. отделом НИИ ПММ

Козлов Е.А. – профессор, зам. директора НИИ ПММ

Крайко А.Н. – профессор, зав. отделом ЦИАМ

Липанов А.М. – действительный член РАН, директор ИПМ УрО РАН

Максимов Ю.М. – профессор, зав.отелом СМК ТНЦ СО РАН

Платова Т.М. – профессор Томского университета

Рабинович Б.И. – профессор, гл. научный сотрудник ИКИ РАН

Фомин В.М. – член – корр. РАН, директор ИТПМ СО РАН

Хоменко Ю.П. – профессор, зам. директора НИИПММ

Швецов Г.А. – профессор, зам. директора ИГ

им. акад. М.А. Лаврентьева СО РАН

Щрагер Э.Р. – профессор, декан ФТФ Томского госуниверситета

О ПРИМЕНЕНИИ МИКРОПОЛЯРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛОВ С СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И НАНОСТРУКТУРОЙ

Смолин И.Ю., Бакеев Р.А., Макаров П.В.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

634021, г. Томск, пр. Академический, 2/1,

тел. (3822) 286937, факс (3822) 492576

E-mail: smolin@isprms.tsc.ru

1. Введение

Одной из первых теорий, неявно учитывающих структуру среды, является модель среды Коссера [1]. В основе этой модели лежит понятие полярной среды, в которой кинематика частицы континуума описывается вектором перемещений и вектором поворота. Это приводит к возникновению в среде изгибов-кручений и моментных напряжений.

Физические причины для применения микрополярных моделей различны для разных материалов. Для металлов на стадии пластического течения — это различные виды внутреннего движения (потoki деформационных дефектов, как наиболее яркий пример), взаимодействие потоков дефектов на границах зерен, недостаток активных систем скольжения и т.д. В субмикроструктурных и наноматериалах существенный вклад дают ротационные механизмы деформации. На мезоуровне осреднение не приводит к компенсации всех внутренних моментов. Как следствие, существенными могут оказаться некомпенсированные внутренние моменты, которые необходимо ввести в рассмотрение. Именно поэтому предлагаемая модель, по мнению авторов, может оказаться полезной и эффективной для новых материалов с субмикроструктурой.

Предлагается модель, объединяющая классическую упругую и слабо нелокальную пластическую модели. Предполагается, что на упругой стадии деформирования тензоры деформации и силовых напряжений остаются симметричными и применима классическая модель упругого тела. На пластической стадии существенным оказывается влияние эволюции дефектной структуры, появляются изгибы-кручения и моментные напряжения.

2. Математическое описание

В случае плоского деформированного состояния кинематика среды Коссера описывается двумя компонентами вектора перемещений u_1, u_2 и одной компонентой независимого поворота ω_3 . Деформированное состояние определяется тензором деформации γ_{ij} и тензором изгибов-кручений (кривизны) κ_{ij} , которые выражаются через компоненты векторов перемещений и поворотов следующим образом:

$$\begin{aligned} \gamma_{11} &= u_{1,1}; \gamma_{22} = u_{2,2}; \gamma_{12} = u_{2,1} - \omega_3; \\ \gamma_{21} &= u_{1,2} + \omega_3; \kappa_{13} = \omega_{3,1}; \kappa_{23} = \omega_{3,2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнения баланса количества движения и моментов количества движения имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_{11,1} + \sigma_{21,2} &= \rho \ddot{u}_1; \sigma_{21,1} + \sigma_{22,2} = \rho \ddot{u}_2; \\ \sigma_{12} - \sigma_{21} + \mu_{13,1} + \mu_{23,2} &= \rho \ell^2 \ddot{\omega}_3, \end{aligned} \quad (2)$$

где ℓ — радиус инерции элементарного объема среды, ρ — плотность.

Для описания упругопластической деформации определяющие соотношения запишем в дифференциальной форме. Полные тензоры скоростей деформации $\dot{\gamma}_{ij}^T$ и изгибов-кручений $\dot{\kappa}_{ij}^T$ представлены как суммы их упругих и пластических составляющих. Определяющие соотношения для диагональных компонент тензора силовых напряжений и компонент тензора моментных напряжений примут вид

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{12} &= (\mu + \alpha)(\dot{\gamma}_{12}^T - \dot{\gamma}_{12}^P) + (\mu - \alpha)(\dot{\gamma}_{21}^T - \dot{\gamma}_{21}^P); \\ \dot{\sigma}_{21} &= (\mu + \alpha)(\dot{\gamma}_{21}^T - \dot{\gamma}_{21}^P) + (\mu - \alpha)(\dot{\gamma}_{12}^T - \dot{\gamma}_{12}^P); \\ \dot{\mu}_{13} &= (\nu + \varepsilon)(\dot{\kappa}_{13}^T - \dot{\kappa}_{13}^P); \dot{\mu}_{23} = (\nu + \varepsilon)(\dot{\kappa}_{23}^T - \dot{\kappa}_{23}^P); \\ \dot{\mu}_{31} &= (\nu - \varepsilon)(\dot{\kappa}_{13}^T - \dot{\kappa}_{13}^P); \dot{\mu}_{32} = (\nu - \varepsilon)(\dot{\kappa}_{23}^T - \dot{\kappa}_{23}^P). \end{aligned} \quad (3)$$

Моментные напряжения μ_{31} и μ_{32} и компонента σ_{33} тензора силовых напряжений обеспечивают условие плоской деформации. Уравнение баланса энергии принимает вид

$$\dot{E} = \sigma_{11} \dot{\varepsilon}_{11} + \sigma_{12} \dot{\varepsilon}_{12} + \sigma_{21} \dot{\varepsilon}_{21} + \sigma_{22} \dot{\varepsilon}_{22} + \mu_{13} \dot{\kappa}_{13} + \mu_{23} \dot{\kappa}_{23}. \quad (4)$$

В результате в случае плоской деформации мы оперируем только двумя новыми «модулями»: α и $\gamma = \nu + \varepsilon$. α — «модуль» для антисимметричных составляющих тензора силовых напряжений, он отражает несимметрию тензора напряжений и имеет ту же размерность, что и модуль сдвига. Модуль γ имеет размерность МПа \times м² и определяет вращательную жесткость среды.

Поворотные моды деформации связаны с формированием деформационных субструктур на развитой стадии пластического течения. При выполнении в каждой локальной точке критерия перехода среды в пластическое состояние расчет выполнялся по моментной модели, параметры которой представлялись как функции накопленной пластической деформации в данном локальном объеме. Для описания первого условия перехода в пластическое состояние воспользуемся классической теорией пластического течения с критерием Мизеса

$f_\sigma(\sigma_{ij}) = 1,5(s_{11}^2 + s_{12}^2 + s_{21}^2 + s_{22}^2 + s_{33}^2)^{1/2} - Y$. Для определения скоростей пластических изгибов зададим свою функцию пластического течения

$f_\mu(\mu_{ij}) = 1,5(\mu_{13}^2 + \mu_{23}^2 + \mu_{31}^2 + \mu_{32}^2)^{1/2} - Y\ell^p$, тогда для скоростей пластических изгибов можно записать

$$\dot{\kappa}_{13}^P = \dot{\lambda}_\mu \frac{\partial f_\mu}{\partial \mu_{13}}, \quad \dot{\kappa}_{23}^P = \dot{\lambda}_\mu \frac{\partial f_\mu}{\partial \mu_{23}}. \quad (5)$$

Таким образом, в условие текучести для моментных напряжений входит предел текучести для сило-

вых сдвиговых напряжений Y и параметр ℓ^p , имеющий размерность длины и отражающий предельный внутренний линейный масштаб.

3. Численная реализация

Для численного решения полученной системы уравнений был обобщен известный метод Уилкинса [2], хорошо зарекомендовавший себя при решении динамических упругих и упругопластических задач механики деформируемых сред. Получаемая разностная схема имеет второй порядок точности. Введение дополнительной степени свободы и дополнительного уравнения движения приводит к необходимости пересмотра условия устойчивости разностной схемы. Для получения решений в расчетах было использовано более жесткое условие устойчивости.

В проведенных расчетах параметры материала соответствовали алюминиевому сплаву 6061-T6: $\rho=2,7$ г/см³, $\mu=27,7$ ГПа, $K=72,8$ ГПа, $Y=300$ МПа, для новых «модулей» и предела текучести для моментных напряжений были приняты следующие выражения: $\alpha = 2,77f(\epsilon^{pl})$ ГПа, $\gamma = 0,01f(\epsilon^{pl})$ ГПа×м², $\ell^{pl} = 0,001f(\epsilon^{pl})$ см, т.е. они плавно менялись с ростом накопленной пластической деформации согласно функции $f(\epsilon^{pl}) = 1 - \exp\left[-\left(2,4\epsilon^{pl}/\epsilon_*^{pl}\right)^2\right]$, где ϵ_*^{pl} — критическое значение интенсивности накопленной пластической деформации, при котором функция выходит на насыщение.

4. Анализ модели и результаты расчетов

В опытах на активное растяжение измеряются две величины: осевая деформация и приложенная нагрузка. Эти величины представляют собой макроскопический отклик изменения энергии в образце при нагружении. Внутри образца развиваются локальные процессы разной природы. Однако на макроуровне большинство материалов не проявляют моментных свойств. Это вовсе не означает, что моментные напряжения не проявляются на нижележащих масштабных уровнях и не вносят свой вклад в накопление энергии или ее диссипацию. Если поведение такой среды представить в рамках классического описания (симметричные силовые напряжения — симметричная деформация), то работа, совершаемая моментными напряжениями на изгибах-кручениях, будет отнесена на счет работы силовых напряжений. На σ - ϵ диаграмме это отразится как дополнительное «упрочнение».

Считая, что на мезоуровне наряду с силовыми напряжениями развиваются и моментные, можно подсчитать работу, совершаемую этими напряжениями в мезообъеме. Представляя эту работу для макрочастицы, где все усредняется в рамках симметричного описания, получаем, что развитие на мезоуровне моментных напряжений приводит к росту усредненных макроскопических напряжений.

На рис. 1 изображены две σ - ϵ диаграммы. Та диаграмма, при расчете которой учтен вклад в энергию деформации от работы моментных напряжений на изгибах-кручениях, лежит выше диаграммы, полученной в расчетах для классической упруго-

пластической среды с линейным упрочнением. Сравнение этих диаграмм показывает, что параболическая стадия упрочнения может быть отнесена к развитию в деформируемом материале изгибов-кручений и моментных напряжений. Такой же пересчет был осуществлен для нагружения мезообъема. Построенные для этого случая диаграммы приведены на рис. 2. Поведение кривых оказывается более сложным ввиду усреднения по большому количеству неоднородностей.

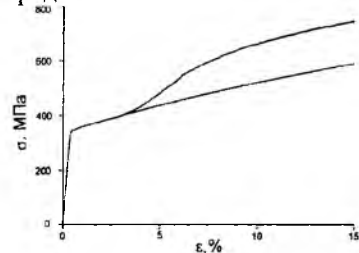


Рис. 1. Диаграммы нагружения для «однородного» материала. Верхний график построен с учетом вклада работы моментных напряжений. Нижний график — расчет по классической упругопластической модели с линейным упрочнением

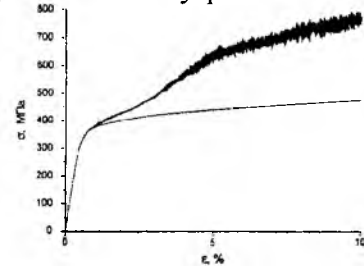


Рис. 2. Диаграммы нагружения для мезообъема, рассчитанные с учетом вклада моментных напряжений (верхняя кривая) и по классической упругопластической модели с линейным упрочнением (нижняя кривая)

5. Заключение

Если представлять реакцию твердого тела на нагружение через усредненную σ - ϵ диаграмму, то следует иметь в виду, что на каждом масштабе будет свое напряженно-деформированное состояние. Представление напряжения для макрочастицы через усреднение силовых и моментных напряжений на мезоуровне показывает, что часть упрочнения среды на параболической стадии упрочнения можно отнести на счет моментных напряжений на мезоуровне. Их вклад в упрочнение будет тем больше, чем более развиты повороты мезофрагментов и моментные напряжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проектов 02-01-01188 и НШ-2324.2003.1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forest S. Cosserat Media // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Elsevier 2001. P. 1715–1718.
2. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. М.: Мир, 1967. С. 212–263.