УДК 539.42 : 620.172.254

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ

Соковиков М. А., Ордянский В. Г.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия
sokovikov@icmm.ru

Многочисленными экспериментальными исследованиями показано, что важными дефектами структуры, определяющими релаксационные свойства и кинетику разрушения реальных материалов, являются микросдвиги, микротрещины - типичные дефекты мезоуровня. [1-6]. Так, многочисленные структурные исследования процессов нагружения с различными скоростями указывают на определяющую роль в явлениях пластического деформирования согласованного поведения ансамбля этих микродефектов. В данном исследовании построена математическая модель, описывающая основные черты пластического деформирования при высокоскоростном нагружении с учетом нелинейного поведения ансамбля взаимодействующих микросдвигов.

Значительное внимание вопросам природы пластической деформации уделено в работах научного направления возглавляемого академиком В. Е. Паниным. [7-9], где развивается представление о деформируемом твердом теле как о многоуровневой системе, в которой пластическое течение развивается как последовательная эволюция потери сдвиговой устойчивости на различных масштабных уровнях: микро, мезо и макро.

Обсуждаемый класс явлений в последние годы исследуется нелинейной физикой [10, 11], рассматривающей данные эффекты с позиций неравновесных ориентационно - кинетических переходов.

В данной работе используется ранее разработанная теория [10], в которой методами статистической физики и термодинамики необратимых процессов изучается влияние микросдвигов на упругие и релаксационные свойства твердых тел. Определяющие уравнения сред с микросдвигами имеют следующий вид:

$$\sigma_{ik} = L_1 e^p_{ik} - L_2 \dot{p}_{ik}, \quad \Pi_{ik} = L_2 e^p_{ik} - L_3 \dot{p}_{ik}, \qquad (1)$$

Здесь p_{ik} – тензор, характеризующий интенсивность и преимущественную ориентацию микросдвигов; $\Pi_{ik} = \partial F / \partial p_{ik}$ – термодинамическая сила, действующая на систему, когда p_{ik} отличается от равновесного (F – свободная энергия среды с микросдвигами); σ_{ik}, e^p_{ik} – тензоры напряжений и скоростей пластических деформаций; L_i – кинетические коэффициенты, зависящие от p_{ik}. Определяющие уравнения материала (1) включают соотношения релаксационного типа для тензора напряжений и уравнения движения для параметра p_{ik}. В этих уравнениях учтены "перекрестные" эффекты: влияние микросдвигов на релаксационные процессы и пластичности на кинетику роста p_{ik}. В дальнейшем рассматривается случай, когда пластическая деформация подчиняется условию $e_{ii}^{p} = 0$ (пластическая несжимаемость материала), а среднее напряжение $\sigma = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$ определяется через упругие составляющие тензора деформаций.

В рамках данной теории были определены характерные реакции материалов на образование дефектов.

Рассматривается цилиндрический образец меди, нагружаемый с постоянной скоростью деформации сжатия, в ходе которого реализуется одномерное напряженное состояние

$$\sigma_{zz} \neq 0, \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0.$$

Используя представление о малости деформаций и скоростей деформаций, для упруго-пластической среды имеем

$$\dot{\varepsilon}_{zz} = \dot{\varepsilon}_{zz}^{e} + \dot{\varepsilon}_{zz}^{p}, \qquad (2)$$

где $\dot{\varepsilon}_{zz}, \dot{\varepsilon}_{zz}^{e}, \dot{\varepsilon}_{zz}^{p}$ - скорости суммарной, упругой, пластической деформации.

Для одномерного напряженного состояния получаем следующую формулировку закона Гука в переменных полной и пластической деформации

$$\sigma_{zz} = E\left(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{zz}^{p}\right), \qquad (3)$$

или в типичном для динамических постановок представлении

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = E\left(\frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial t} - \frac{\partial \varepsilon_{zz}^{p}}{\partial t}\right). \qquad (4)$$

Для пластической составляющей тензора скоростей деформации существенна девиаторная компонента тензора напряжений

$$\sigma'_{zz} = \frac{2}{3}\sigma_{zz}, \qquad (5)$$

с учетом которой релаксационные уравнения, описывающие упруго-пластические свойства среды с дефектами, имеют вид:

$$\sigma'_{zz} = l_1\dot{\varepsilon}_{zz}^{p} - l_2\frac{\partial p_{zz}}{\partial t}, \qquad (6)$$

$$\Pi_{zz} = l_2\dot{\varepsilon}_{zz}^{p} - l_3\frac{\partial p_{zz}}{\partial t}, \qquad (7)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = -\Pi_{\delta}. \qquad (8)$$

Скорость деформации образца предполагается постоянной

$$\dot{\varepsilon}_{zz}(t) = e, \qquad (9)$$

и решение системы удовлетворяет начальным условиям

$$\sigma_{zz}(0) = \dot{\varepsilon}_{zz}^{p}(0) = p_{zz}(0) = 0, \quad \delta(0) = 2.0 \qquad (10)$$

$$t \in [0, \infty)$$

Здесь t – время; $\sigma_{zz}, \sigma'_{zz}, \dot{\varepsilon}_{zz}, \dot{\varepsilon}_{zz}^{p}, p_{zz}$ – компоненты тензоров напряжений, девиатора напряжений, скоростей деформаций, скоростей пластических деформаций, параметра плотности микросдвигов; E – модуль упругости первого рода; δ – параметр скейлинга, l_1, l_2, l_3 – кинетические коэффициенты, $\Pi_{zz} = \frac{\partial F}{\partial p_{zz}}$, $\Pi_{\delta} = \frac{\partial F}{\partial \delta}$, где $F(p_{zz}, \delta)$ – свободная энергия.

Введя переменные

$$\bar{\sigma}_{zz} = \frac{\sigma_{zz}}{G},\ \bar{\sigma}'_{zz} = \frac{\sigma'_{zz}}{G},\ \bar{\dot{\varepsilon}}_{zz} = \dot{\varepsilon}_{zz}\Delta t,\ \bar{\dot{\varepsilon}}^{p}_{zz} = \dot{\varepsilon}^{p}_{zz}\Delta t,\ \bar{t} = \frac{t}{\Delta t},$$

где $\Delta t = l_1 / G$, $\bar{\Pi}_{zz} = \dfrac{\Pi_{zz}}{G}$, $\bar{\Pi}_{\delta} = \dfrac{\Pi_{\delta}}{G}$,

представим систему уравнений (4) – (10) в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{zz}}{\partial \bar{t}} = \frac{E}{G}\left(e - \bar{\dot{\varepsilon}}^{p}_{zz}\right), \tag{11}$$

$$\bar{\sigma}'_{zz} = \frac{2}{3}\bar{\sigma}_{zz}, \tag{12}$$

$$\bar{\dot{\varepsilon}}_{p} = \bar{\sigma}'_{zz} + \frac{l_2}{l_1}\frac{\partial p_{zz}}{\partial \bar{t}}, \tag{13}$$

$$\frac{\partial p_{zz}}{\partial \bar{t}} = \frac{l_1}{l_3}\bar{\dot{\varepsilon}}_{p} - \Pi'_{zz}, \tag{14}$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial \bar{t}} = -\Pi'_{\delta}, \tag{15}$$

где $\Pi' = \Delta t \cdot \Pi_{zz} = \dfrac{l_1}{G}\Pi_{zz} = l_1\bar{\Pi}_{zz}$, $\qquad \Pi'_{\delta} = \Delta t \cdot \Pi_{\delta} = \dfrac{l_1}{G}\Pi_{\delta} = l_1\bar{\Pi}_{\delta}$.

Функция Π' аппроксимировалась выражением

$$\Pi' = -A_1 \cdot \bar{\sigma}'_{zz} + A_2 \cdot p_{zz} \cdot \delta - A_3 \cdot \exp(-p_a / p_{zz}) + A_4, \tag{16}$$

где A_1, A_2, A_3, A_4, p_a – параметры аппроксимации.

Для функции Π'_{δ} в соответствие с результатами статистической модели выбрано представление

$$\Pi'_{\delta} = \delta - \frac{B_1}{p_{zz}} - B_2 \cdot \exp\left(-\frac{p_{\delta}}{p_{zz} \cdot \bar{\sigma}'_{zz}}\right) - B_3, \tag{17}$$

где $B_1, B_2, B_3, p_{\delta}$ – параметры аппроксимации.

Численное исследование системы (12) – (17) проводилось методом конечных разностей. Использовались следующие значения констант для меди

$G = 0.4 \cdot 10^{11}$ Па,

$E = 1.12 \cdot 10^{11}$ Па,

$l_1 = 4.08 \cdot 10^{7}$ Па с, $l_2 = 1.84 \cdot 10^{7}$ Па с, $l_3 = 4.08 \cdot 10^{7}$ Па с,

$A_1 = 8.0$, $A_2 = 0.1$, $A_3 = 0.04$, $A_4 = -1.25 \cdot 10^{-4}$, $p_a = 2.9 \cdot 10^{-3}$,

$B_1 = 1.0 \cdot 10^{-3}$, $B_2 = 1.0 \cdot 10^{-6}$, $B_3 = -3.0$, $p_{\delta} = 1.0 \cdot 10^{-4}$.

Результаты численного моделирования

На рис.1,2 представлены результаты численного моделирования динамического сжатия цилиндрических образцов с различными скоростями деформирования. С ростом скоростей деформирования образца наблюдается рост напряжений течения, рис.1.

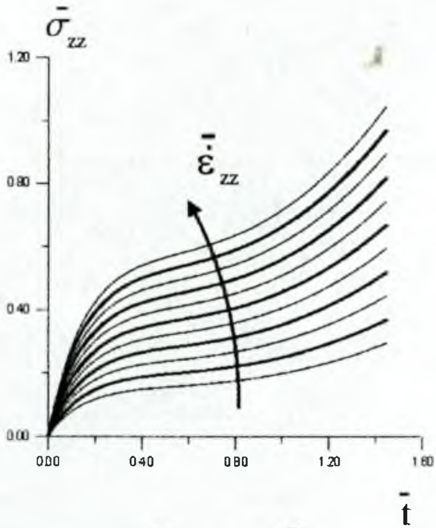

Рис.1. Зависимость напряжения $\bar{\sigma}_{zz}$ от времени $\bar{t}$ при одноосном сжатии с постоянной скоростью дефомации;
скорости деформации $\dot{\bar{\varepsilon}}_{zz} = 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1.0; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4.$

С увеличением скоростей деформирования образцов происходит рост скоростей пластических деформаций. Развитые пластические деформации сопровождаются увеличением скоростей изменения параметра плотности микросдвигов, рис. 2. В процессе упрочнения скорости изменения параметра плотности микросдвигов уменьшаются при всех скоростях деформации, рис.2. Наблюдаемые закономерности объясняются тем, что в процессе деформирования происходят множественные ориентационно – кинетические переходы в ансамблях микросдвигов, вследствие чего наблюдается развитие пластических деформаций. С ростом деформации происходит изменение характерных реакций материала на образование микросдвигов, следствием чего является упрочнение.

Рост напряжений течения с ростом скоростей деформирования можно объяснить большим проникания в область метастабильности и изменением характерных реакций материала на образование микросдвигов. Падение скоростей пластической деформации в процессе упрочнения является следствием падения скоростей изменения параметра плотности микросдвигов, обусловленное изменением характерных реакций материала на образование микросдвигов. Для количественного определения констант модели использовалась численная процедура по методу наименьших квадратов.

Исследования проводились при частичной поддержке грантов РФФИ 02-01-00736, 04-01-96042, проектов МНТЦ № 1181 и №2146.

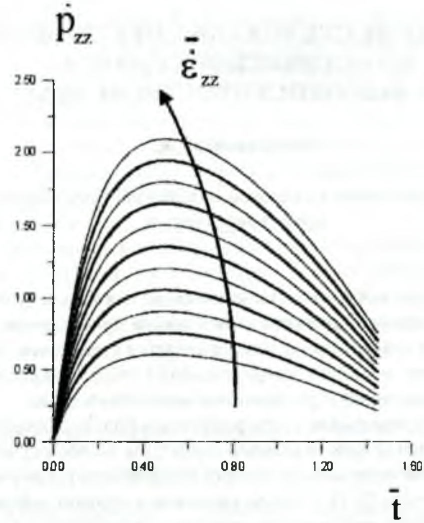

Рис.2. Зависимость скорости изменения параметра плотности микросдвигов $\dot{\bar{p}}_{zz}$ от времени $\bar{t}$ при одноосном сжатии с постоянной скоростью деформации; скорости деформации $\dot{\bar{\varepsilon}}_{zz} = 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1.0; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4$.

Список литературы

1. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. - М.: Металлургия, 1984. - 280 с.
2. Финкель В.М. Физика разрушения - М.: Металлургия, 1970.-376 с.
3. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. - Рига: Зинатне, 1978. - 294 с.
4. Макклинток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов - М.: Мир, 1970. - 454 с.
5. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. - М.: Наука, 1974. - 560 с.
6. Бетехтин В.И., Владимиров В.И., Кадомцев А.Г., Петров А.И Пластическая деформация и разрушение кристаллических тел // Проблемы прочности. - 1979.-N7.-С.38-45; N8.-С.51-57; N9.-С.3-9.
7. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. - Новосибирск: Наука, 1985.- 229с.
8. Панин В.Е. Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. - Новосибирск: Наука, 1990. - 225с.
9. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов в 2-х т./ Под ред. В.Е.Панина. - Новосибирск: Наука, 1995. - 297с. и 320с.
10. Наймарк О.Б. О термодинамике деформации и разрушение твердого тела с микротрещинами. Институт механики сплошных сред, АН СССР, Свердловск., 1982.- С.3-34.
11. Naimark, O.B. Kinetic transition in ensembles of microcracks and some nonlinear aspects of fracture. In: Proceedings IUTAM Symposium on nonlinear analysis of fracture. Kluver, The Netherlands, 1996.