

Министерство образования Российской Федерации
Ивановский государственный университет

На правах рукописи



Тихомирова Ирина Сергеевна

**Математическое моделирование равновесий и их изменений
в явлениях упруго-пластического деформирования тел**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы
программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иваново – 2001

Работа выполнена в Ивановском государственном университете

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор Лев Николаевич Маурин

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук,
профессор Юрий Клавдиевич Братухин
(Пермский государственный университет)
- доктор технических наук,
профессор Владимир Александрович Годлевский
(Ивановский государственный университет)

Ведущая организация:

Ивановский государственный энергетический университет

Защита состоится « 29 » января 2002 г. в 14 ч.
на заседании диссертационного совета КР 212.062.13
в Ивановском государственном университете,
153025, Иваново, ул. Ермака 37,
учебный корпус №1, ауд. 318.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИВГУ.

Автореферат разослан 27 декабря 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук, доцент -
В. М. Озерова



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

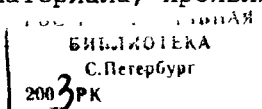
Актуальность темы. Одной из нерешенных проблем механики сплошных сред является задача построения математической модели упруго-пластической деформации, способной описать явление прерывистой текучести. В ходе экспериментальных исследований пластической деформации материалов, проведенных разными авторами (см., например, [1-6]), было обнаружено, что деформационные кривые имеют не гладкий, а пилообразный, либо ступенчатообразный вид (рис. 1). Создается впечатление, что пластическая деформация развивается не равномерно, а скачкообразно, причем неравномерное развитие пластической деформации наблюдается не только на макро-, но и на микроуровне. В настоящее время существуют теории, описывающие такое деформационное поведение с позиции кинетики дислокаций. Однако этот кинетический подход не решает до конца проблемы, связанной с переходом от микроскопических аспектов пластической деформации к макроскопическим. Поэтому создание математических моделей, описывающих прерывистый характер пластического деформирования на макроскопическом уровне, является актуальной задачей.

Цель работы. Целью работы является построение макроскопической феноменологической модели процесса упруго-пластического деформирования материала, способной описать пилообразный вид деформационных зависимостей.

Методы исследования. В основе представленного исследования лежат принципы математического моделирования. При построении модели упруго-пластического деформирования материала была использована методология функций состояния. При выполнении вычислений был применен один из численных методов решения дифференциальных уравнений первого порядка (метод Рунге-Кутты четвертого порядка) для нахождения зависимостей $\sigma(\varepsilon)$ и $\sigma(t)$ в модели с параметром ε , и $\sigma(\varepsilon)$ и $\varepsilon(t)$ для модели с параметром σ при скачкообразном упруго-пластическом переходе в пространстве состояний деформированного тела.

Автор защищает:

1. математическую модель, описывающую на макроскопическом уровне поведение материала, проявляющего упруго-пласти-



ческие свойства при воздействии на этот материал механической нагрузки, приложенной вдоль одного направления;

2. математическую модель процесса упруго-пластического деформирования материала в случаях сложного напряженного/деформированного состояния;
3. математическую модель, описывающую динамику изменения напряжения в модели с параметром ε и деформации в модели с параметром σ .

Научная новизна работы:

1. введено понятие Δ -решетки, образуемой множеством равновесных состояний, реализующихся при упруго-пластическом деформировании материала, как при одноосном деформировании, так и в случае сложного напряженного состояния. Построены функции состояния деформированного упруго-пластического тела. Из предложенной математической модели следует, что процесс пластического деформирования реализуется в результате потери устойчивости и сопровождается скачкообразным переходом с одного «прута» Δ -решетки на другой;
2. построена математическая модель, описывающая динамику изменения упруго-пластического состояния деформируемого тела;
3. определен вид зависимостей напряжение - деформация $\sigma(\varepsilon)$ в процессе смены одного устойчивого состояния деформируемого материала другим;
4. показано, что на участках падения напряжения деформационных кривых пилообразного вида имеет место явление релаксации напряжений.

Практическая значимость результатов. Результаты математического моделирования могут быть использованы для более глубокого понимания и дальнейшего развития теории процессов, происходящих при пластическом деформировании материалов.

Достоверность результатов подтверждается качественным согласием результатов моделирования с экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные положения диссертационного исследования доложены и обсуждены на следующих научных конференциях: Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (IX Бенардосовские чтения, Иваново 1999 г.); Всероссийская научная конференция ВНКФ-7 (Санкт-Петербург, 2001); Международная научная конференция «Молодая наука - XXI веку» (Иваново, 2001 г.); объединенном заседании кафедры теоретической физики, математического и компьютерного моделирования Ивановского государственного университета.

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 5 печатных работ [1-5] и 2 электронные публикации [6-7].

Структура и объем работы. Диссертация включает: введение, четыре главы, заключение, три приложения, список литературы, содержит 151 страницу печатного текста, одну таблицу, 95 иллюстраций, список литературных источников из 149 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении представлена общая характеристика проблемы и ее актуальность. Определены общие цели работы, а также теоретическая и методологическая база исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, изложены научная новизна и практическая значимость работы. А также кратко раскрыта структура диссертации.

В первой главе изложены основные принципы построения математических моделей, причем делается акцент на многоуровневость описания физических процессов, происходящих в средах. Для понимания сложности изучаемого процесса приводится краткая характеристика концепции структурных уровней деформации с выделением трех основных уровней описания (микро-, мезо- и макроуровни). Ввиду того, что предлагаемая математическая модель упруго-пластического деформирования рассматривает данный процесс на макроскопическом уровне описания, далее рассматриваются макроскопические модели пластического деформирования, имеющиеся в теории пластичности и реологии.

Вторая глава посвящена построению математической модели равновесных состояний при одноосном упруго-пластическом деформировании. В основу модели положена гипотеза о существовании такой функции состояния, которая в условиях упруго-пластического равновесия имеет экстремальное значение. Эта гипотеза опирается на экспериментальные данные, в частности, связанные с акустической эмиссией и эффектом Кайзера [5, 6, 7] и позволяющие сделать вывод о скачкообразном характере изменения пластической составляющей деформации при упруго-пластической деформировании материала. На основе анализа этих экспериментальных данных нами делается вывод о том, что упруго-пластические равновесные состояния образуют множество типа решетки (рис. 2). Далее мы называем это множество Δ -решеткой.

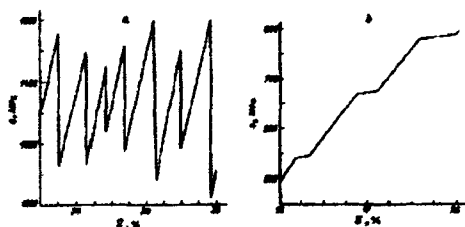


Рисунок 1. Различные формы проявления неустойчивости деформации: а - нержавеющей сталь, 4.2 К, $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, растяжение; б - титан, вид скачков при фиксированной скорости нагружения, 4.2 К, 1 Гц [1].

В отличие от методологии теории катастроф в настоящей работе изначально строится не сама функция состояния, а ее производная, причем вид этой производной выбирается таким образом, чтобы удовлетворять требованию экстремальности на Δ -решетке.

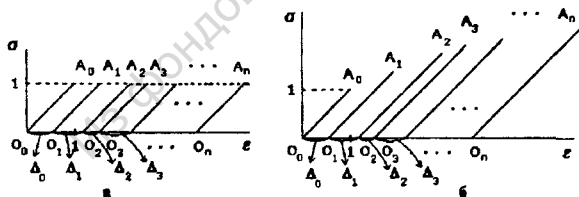


Рисунок 2. Δ -решетки идеально пластического (а) и упрочняющегося (б) материалов.

Необходимое для получения функции состояния построение заключается в соединении верхнего конца каждого «прута» Δ -ре-

шетки с нижним концом следующего «прута» (рис. 3). Эти отрезки, изображенные на рисунке 3 пунктирными линиями, образуют еще одну решетку, которую будем называть дополняющим множеством или дополняющим семейством.

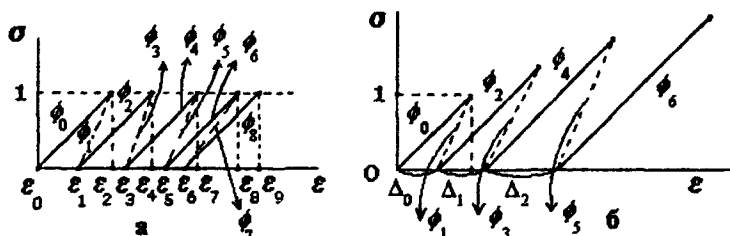


Рисунок 3. Δ -решетка и дополняющее семейство для идеально пластического (а) и упрочняющегося (б) материалов.

После выполнения всех необходимых построений для функции состояния с параметром σ получим:

$$(1) \quad \Phi = \Phi_n(\varepsilon; \sigma),$$

$$(2a) \quad \Phi'_n = \frac{d\Phi_n}{d\varepsilon} = - \prod_{s=-k}^k (\sigma - \phi_{n-s}(\varepsilon)),$$

(2б) $\varepsilon_i \leq \varepsilon < \varepsilon_{i+1}$, если ε_i - проекция на ось ε нижнего конца «прута», а ε_{i+1} - проекция на ось ε нижнего конца следующего «прута»;

(2в) $\varepsilon_l \leq \varepsilon < \varepsilon_{l+1}$, если ε_l - проекция на ось ε нижнего конца «прута», а ε_{l+1} - проекция на ось ε верхнего конца «прута», определенной функцией ϕ_l , где $l < i$;

(2г) $\varepsilon_i < \varepsilon < \varepsilon_{i+1}$, если ε_i - проекция верхнего конца одного «прута», а ε_{i+1} - проекция на ось ε нижнего конца следующего «прута»;

(2д) $\varepsilon_i < \varepsilon \leq \varepsilon_{i+1}$, если ε_i - проекция на ось ε верхнего конца «прута», а ε_{i+1} - проекция на ось ε верхнего конца следующего «прута»;

(3) $\Phi_n(\varepsilon_{n+1}) = \Phi_{n+1}(\varepsilon_{n+1})$, где $n < (N-1)$ - условие сшивания,

здесь N - количество интервалов на оси ε , σ играет роль параметра. При этом

$$(4) \quad \phi_i(\varepsilon) = \varepsilon - \sum_{l=0}^{\frac{i-1}{2}} \Delta_l, \quad i = 2 \cdot m, \quad \text{для «прутьев» } \Delta\text{-решетки, и}$$

$$(5) \quad \phi_i(\varepsilon) = k_i \cdot \left(\varepsilon - \sum_{l=0}^{\frac{i-1}{2}} \Delta_l \right), \quad i = 2 \cdot m + 1, \quad \text{для отрезков дополняющего семейства.}$$

Здесь $k_i = \frac{\left(\varepsilon - \sum_{l=0}^{m-1} \Delta_l \right)}{\left(\varepsilon - \sum_{l=0}^m \Delta_l \right)} = 1 + \frac{\Delta_m}{\varepsilon - \sum_{l=0}^m \Delta_l}$, а ε равно значению деформации в

точке A_m .

Как нетрудно видеть из (1) - (5), данная функция удовлетворяет требованиям устойчивости состояний на «прутьях» Δ -решетки и неустойчивости на отрезках дополняющего семейства.

Рассмотрение возможных переходов для модели с параметром σ показало, что предложенная модель описывает только часть имеющихся экспериментальных данных, а именно, кривые $\sigma(\varepsilon)$, полученные при деформировании на мягком нагружающем устройстве (рис. 1b). А пилообразные кривые (деформирование на жестком нагружающем устройстве) остаются неохваченными данной моделью, поэтому делается вывод о необходимости построения функции состояния с параметром ε . Эта функция состояния имеет следующий вид:

$$(6a) \quad \Phi_n(\sigma_{n+1}) = \Phi_{n+1}(\sigma_{n+1}) - \text{условие непрерывности функции состояния,}$$

$$(6b) \quad \Phi'_n = \frac{d\Phi_n}{d\sigma} = - \prod_{i=2n}^{2(N-1)} (\varepsilon - \psi_i(\sigma)) = \prod_{i=2n}^{2(N-1)} (\psi_i(\sigma) - \varepsilon),$$

для области $\sigma_n < \sigma \leq \sigma_{n+1}$, если $n \neq 0$, или $\sigma_n \leq \sigma \leq \sigma_{n+1}$, если $n = 0$. Здесь N - количество «прутьев» Δ -решетки, для «прутьев» Δ -решетки

$$(7) \quad \psi_i(\sigma) = \sigma + \sum_{l=0}^{\frac{i-1}{2}} \Delta_l, \quad i = 2 \cdot m,$$

а для отрезков дополняющего семейства

$$(8) \quad \psi_i(\sigma) = \frac{1}{k_i} \cdot \sigma + \sum_{l=0}^{i-1} \Delta_l, \quad i = 2 \cdot m + 1,$$

где k_i такое же, как в (5), а ε равно значению деформации в точке A_m . При этом функция состояния также строится на Δ -решетке с тем же дополняющим семейством. Данная функция состояния также удовлетворяет требованиям устойчивости состояний на «прутьях» Δ -решетки и неустойчивости на отрезках дополняющего семейства.

Далее в этой главе рассматривается пример построения Δ -решетки частного вида, в основе которого лежит гипотеза подобия.

В третьей главе строится математическая модель упруго-пластического деформирования для случая сложного напряженного состояния. В основе данного построения лежат идеи, изложенные во второй главе. Для реализации поставленной задачи вводятся две величины: интенсивность касательных напряжений $T^* = +\sqrt{J_2(D\sigma)} = \sqrt{\frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}}$, где s_{ij} - компоненты девиатора напряжений, и интенсивность деформаций сдвига $\Gamma = +2 \cdot \sqrt{J_2(D\varepsilon)} = \sqrt{2 \cdot e_{ij} e_{ij}}$, где e_{ij} - компоненты девиатора деформаций.

Используя введенные величины, записывается обобщенный закон Гука $T = G \Gamma$, где T - безразмерная величина, равная отношению интенсивности касательных напряжений к модулю сдвига G . Тогда аналогично одномерному случаю можно определить множество устойчивых состояний на плоскости, то есть построить Δ -решетку в осях $T - \Gamma$ (рис. 4).

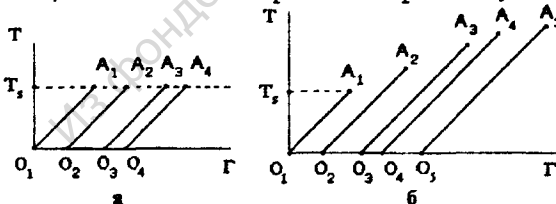


Рисунок 4. Δ -решетка сложного напряженного состояния: идеально пластический (а) и упрочняющийся (б) материалы.

После выполнения дополнительных построений (нужно соединить верхний конец каждого «прута» Δ -решетки с нижним кон-

цом следующего «прута») записываются функции состояния, которые строятся аналогично функциям состояния одномерной модели, но с заменой σ на T , а ε на Γ :

функция состояния с параметром T :

$$(9) \quad \Phi = \Phi_n(\Gamma; T), \quad \Phi'_n \equiv \frac{d\Phi_n}{d\Gamma} = - \prod_{s=-k}^k (T - \Phi_{n-s}(\Gamma)),$$

$$(10) \quad \Phi_n(\Gamma_{n+1}) = \Phi_{n+1}(\Gamma_{n+1}) - \text{условие сшивания},$$

где $n < (N-1)$, здесь N - равно количеству интервалов на оси Γ , а Φ'_n определяется для одной из следующих областей значений интенсивности деформаций сдвига Γ :

(11а) $\Gamma_i \leq \Gamma < \Gamma_{i+1}$, если Γ_i - проекция на ось ε нижнего конца «прута», а Γ_{i+1} - проекция на ось ε нижнего конца следующего «прута»;

(11б) $\Gamma_i \leq \Gamma \leq \Gamma_{i+1}$, если Γ_i - проекция на ось ε нижнего конца «прута», а Γ_{i+1} - проекция на ось ε верхнего конца «прута», определенного функцией Φ_l , где $l < i$;

(11в) $\Gamma_i < \Gamma < \Gamma_{i+1}$, если Γ_i - проекция верхнего конца одного «прута», а Γ_{i+1} - проекция на ось ε нижнего конца следующего «прута»;

(11г) $\Gamma_i < \Gamma \leq \Gamma_{i+1}$, если Γ_i - проекция на ось ε верхнего конца «прута», а Γ_{i+1} - проекция на ось ε верхнего конца следующего «прута»;

В выражении (9) $\Phi_i(\Gamma)$ имеют следующий вид:

для «прутьев» Δ -решетки $\Phi_i(\Gamma) = \Gamma - \sum_{l=0}^{\frac{i-1}{2}} \Delta_l$, $i = 2 \cdot m$,

а для отрезков дополняющего семейства

$$\Phi_i(\Gamma) = k_i \cdot \left(\Gamma - \sum_{l=0}^{\frac{i-1}{2}} \Delta_l \right), \quad i = 2 \cdot m + 1, \quad \text{где } k_i = \frac{\left(\Gamma - \sum_{l=0}^{m-1} \Delta_l \right)}{\left(\Gamma - \sum_{l=0}^m \Delta_l \right)} = 1 + \frac{\Delta_m}{\Gamma - \sum_{l=0}^m \Delta_l},$$

а Γ равно значению деформации в точке A_m , то есть для $\Gamma = \Gamma^*$, где $\sum_{l=0}^k \Delta_l < \Gamma^* < \sum_{l=0}^{k+1} \Delta_l$;

функция состояния с параметром Γ :

$$(12) \quad \Phi'_n = \frac{d\Phi_n(T, \Gamma)}{d\Gamma} = - \frac{2(N-1)}{\prod_{i=2n} (\Gamma - \psi_i(T))},$$

$$(13) \quad \Phi_n(\Gamma_{n+1}) = \Phi_{n+1}(\Gamma_{n+1})$$

для области $T_n < T \leq T_{n+1}$, если $n \neq 0$, или $T_n \leq T \leq T_{n+1}$, если $n=0$. Здесь N - количество «прутьев» Δ -решетки.

Обе функции состояния удовлетворяют требованиям устойчивости состояний на «прутьях» Δ -решетки и неустойчивости на отрезках дополняющего семейства.

Как видно из вышеизложенного, мы можем определить Γ и T , а сами компоненты девиаторов деформации e_{ij} и напряжений s_{ij} пока еще остаются неопределенными. Поэтому далее находятся e_{ij} и s_{ij} для двумерной и трехмерной моделей. При этом вводится гипотеза пропорционального приращения компонент девиатора напряжений/деформаций.

В качестве иллюстрации определения устойчивых состояний рассматривается двумерная модель, в которой компоненты девиаторов напряжений и деформации определены в главных осях. Тогда в трехмерном пространстве Δ -решетку можно изобразить в виде конусов, точки на поверхностях которых являются устойчивыми, то есть им соответствуют равновесные упруго-пластические состояния деформируемого материала (на рис. 5 рассмотрен случай Δ -решетки, состоящей из трех прутьев).

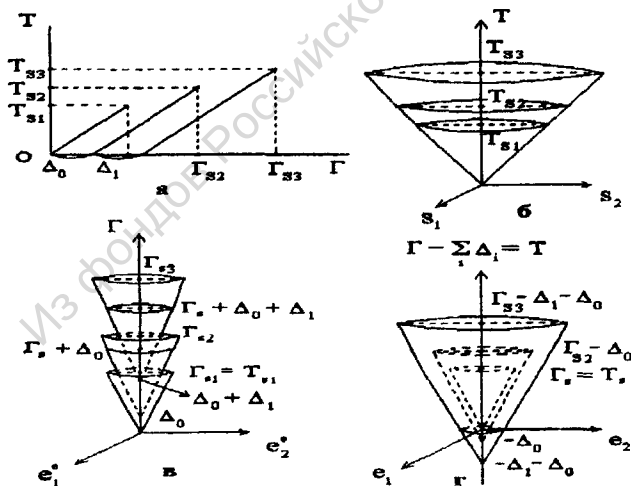


Рисунок 5. Поверхности Γ и T в главных осях для двумерной модели, соответствующие каждому «прутью» Δ -решетки.

Четвертая глава посвящена исследованию динамики упруго-пластических переходов. Здесь мы определяем следующие зависимости: $\sigma(\varepsilon)$ и $\sigma(t)$ или $\varepsilon(t)$. Мы предполагаем, что эти переходы можно описать по схеме Гинзбурга-Ландау:

$$(14) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\gamma \cdot \frac{\partial V(\rho; \mu)}{\partial \rho},$$

где γ - коэффициент, ρ - переменная состояния, μ - управляющий параметр, V - функция состояния. В качестве переменной состояния и управляющего параметра в модели, определенной выражениями (1) - (5), являются ε и σ , а в выражениях (6) - (8) - σ и ε , соответственно. Тогда для этих моделей управляющее уравнение примет вид:

параметр σ :

$$(15) \quad \dot{\sigma} = -\lambda \cdot \frac{\partial \Phi_n(\varepsilon; \sigma)}{\partial \sigma} = \lambda \cdot \prod_{s=-k}^k (\sigma - \Phi_{n-s}(\varepsilon)),$$

параметр ε :

$$(16) \quad \dot{\varepsilon} = -\mu \cdot \frac{\partial \Phi_n(\sigma; \varepsilon)}{\partial \varepsilon} = \mu \cdot \prod_{i=2n}^{2(N-1)} (\varepsilon - \psi_i(\sigma)).$$

Уравнения (15) - (16) можно проинтегрировать при постоянных значениях параметров. Если параметры зависят от времени, то в этом случае проводится численное интегрирование с помощью метода Рунге-Кутты четвертого порядка.

Для модели с параметром σ (см. (15)) после численного интегрирования нами были получены результаты, приведенные на рисунке 6 для Δ -решетки, состоящей из 5 «прутьев», со значениями $\varepsilon_i = (1, 2, 3.7, 4.7, 5.7)$, $\sigma_i = (1, 1.5, 2.15, 2.2, 2.5)$, $\Delta_i = (0.5, 1.05, 0.95, 0.7)$, $\lambda = 1$, где ε_i и σ_i - величины деформации и напряжения на верхних концах «прутьев».

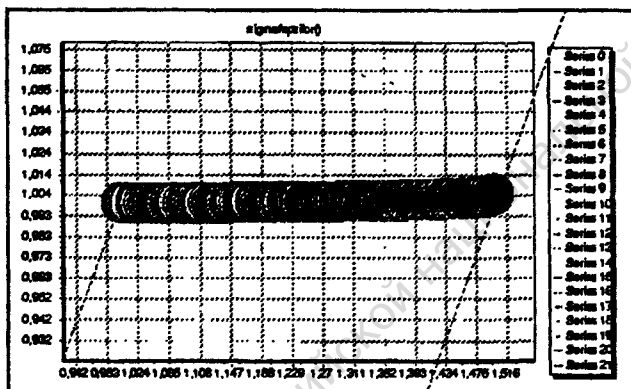
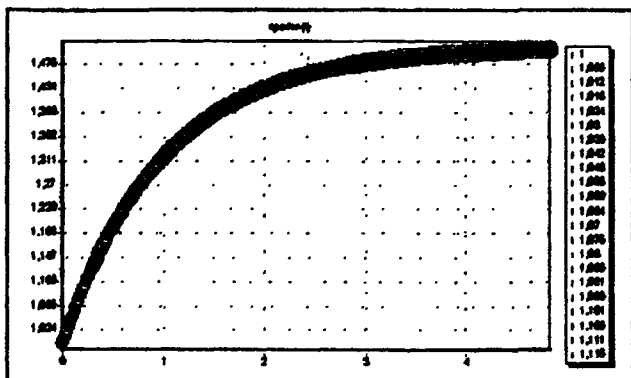


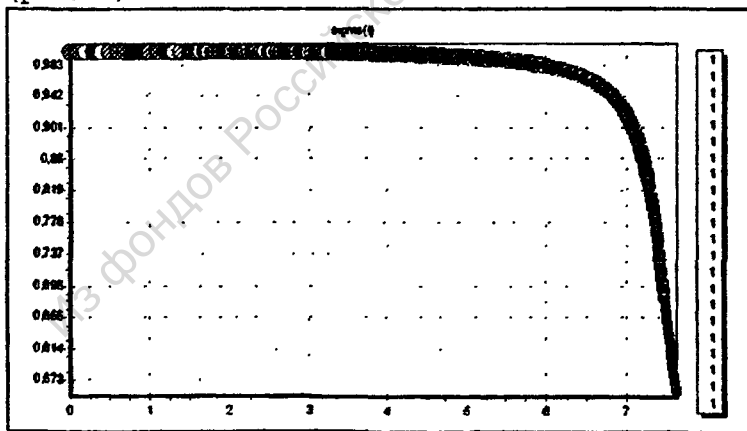
Рисунок 6 а, б. Динамика перехода в модели с параметром σ при $\delta = 0.001$: а - зависимость $\epsilon(t)$; б - зависимость $\sigma(\epsilon)$.

Для последующего сравнения с экспериментальными кривыми нами был выбран линейный закон изменения напряжения со временем, то есть моделировались процессы с постоянной скоростью нагружения. Как оказалось, с увеличением скорости нагружения δ угол наклона касательных к кривой $\sigma(\epsilon)$ (в процессе перехода) увеличивается. При этом также постепенно увеличивается время скачка. Также было обнаружено, что существует некоторая граница для значений скорости нагружения, а точнее величины δ . При переходе за данную границу качественно изменяется поведение деформируемого материала при появлении новых «прутьев» на исследуемом участке оси деформации. В нашем случае критическое

значение δ равно 1, при этом деформационная кривая имеет почти гладкий вид. При δ меньшем критического значения появление нового «прута» в неустойчивом состоянии системы вызывает уменьшение роста деформации с увеличением напряжения, то есть $\frac{de}{d\sigma}$ уменьшается по сравнению со значением на предыдущем отрезке оси деформации. А исчезновение «прута», как легко догадаться, приводит к увеличению $\frac{de}{d\sigma}$. При этом с появлением нового «прута» увеличивается время нахождения системы в неустойчивом состоянии, то есть уменьшается скорость прироста деформации $\frac{de}{dt}$.

В случае, когда скорость нагружения больше или равна критическому значению, наблюдается обратная картина. С появлением новых «прутьев» возрастает $\frac{de}{d\sigma}$ и уменьшается $\frac{de}{dt}$, а исчезновение «прута» приводит к уменьшению $\frac{de}{d\sigma}$ и увеличению $\frac{de}{dt}$.

Численное решение уравнения (16) (модель с параметром ε) дает следующую картину распределения $\sigma(\varepsilon)$ и $\sigma(t)$ (рис. 7).



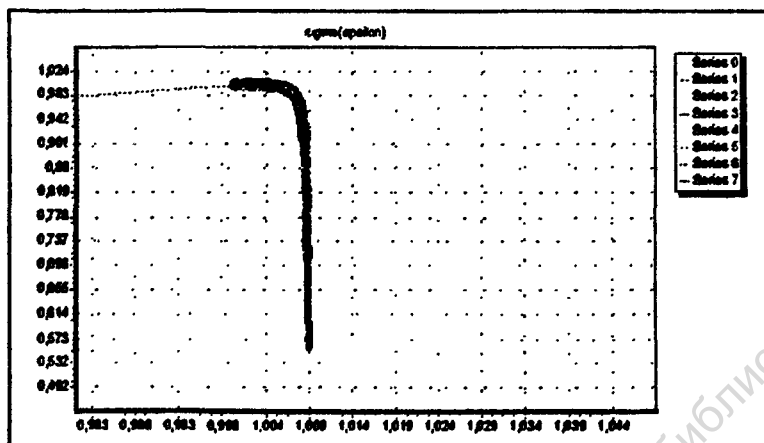


Рисунок 7 а, б: Динамика перехода в модели с параметром ϵ при $\dot{\epsilon} = 0.001$: а - зависимость $\sigma(t)$; б - зависимость $\sigma(\epsilon)$.

На рис. 7 приведены графики для Δ -решетки, состоящей из двух «прутьев», со значениями $\Delta_0 = 0.5$, $\epsilon_1 = (1, 2)$, $\sigma_1 = (1, 1.5)$, $\mu = 100$. Итак, переход с одного «прута» на другой происходит по кривой с отрицательным наклоном касательной к данной кривой, то есть при уменьшающемся напряжении. Данное поведение напряжения совпадает с имеющимися диаграммами деформации для «жесткого» нагружающего устройства. Здесь производится сравнение именно с этим видом диаграмм, так как изучаем модель с параметром ϵ . Анализ зависимости динамики переходов от скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ показал, что в процессе уменьшения напряжения уменьшается (по абсолютному значению) тангенс угла наклона касательной к кривой $\sigma(\epsilon)$. Мы так же получили, что уменьшение скорости деформирования приводит к более резкому падению напряжения. А увеличение $\dot{\epsilon}$ к уменьшению амплитуды скачков, что подтверждается экспериментом.

Изучение динамики для модели с параметром ϵ предсказывает существование релаксации напряжений на ниспадающих участках деформационных кривых (см. рис.1).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В заключение отметим, что в соответствии с определенной ранее целью диссертационного исследования была построена макроскопическая модель упруго-пластического деформирования. Согласно этой модели устойчивые упруго-пластические состояния образуют решетку. При этом процесс пластического деформирования связан со сменой одного устойчивого состояния другим.

Сравнение результатов моделирования показало качественное согласие с имеющимися экспериментальными данными.

В диссертации были получены следующие результаты:

- построена математическая модель упруго-пластической деформации, как при одноосном деформировании, так и в случае сложного деформирования. Согласно этой модели равновесные упруго-пластические состояния образуют решетку;
- процесс пластического деформирования реализуется только при переходе с одного «прута» Δ -решетки на следующий. Этот переход носит скачкообразный характер;
- для трехмерной и двумерной моделей исследована возможность нахождения компонент девиаторов деформаций и напряжений;
- на основе анализа экспериментальных данных выделено два класса функций состояния, описывающих упруго-пластическое поведение материала в зависимости от выбранного параметра;
- для каждого класса функций состояния определены возможные скачкообразные переходы и предложены механические модели, иллюстрирующие потерю устойчивости для двух простейших случаев: при постоянной деформации и при постоянном напряжении;
- для описания динамики перехода с одного «прута» Δ -решетки на следующий использовано управляющее уравнение типа уравнения Гинзбурга-Ландау;
- на основе численного исследования управляющего уравнения получены деформационные зависимости $\sigma(\varepsilon)$ и $\sigma(t)$ для жесткого нагружения и $\sigma(\varepsilon)$ и $\varepsilon(t)$ для мягкого нагружения;

- исследовано влияние на вид деформационной кривой скорости деформирования в модели с параметром ε и скорости нагружения в модели с параметром σ ;
- показано, что в неустойчивом состоянии системы имеет место релаксация напряжений для жесткого нагружения и релаксация деформации для мягкого нагружения.

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

1. Маурин Л.Н., Тихомирова И.С. Решетка как образ структуры множества упругопластических состояний среды. Ч. 2. Модель с гипотезой подобия // Вестник Иван. гос. ун-та. Сер. Биология, химия, физика, математика. 2000. Вып. 3. С. 82-84.
2. Тихомирова И.С. Катастрофа сборки как образ и модель пластификации // Вестник Иван. гос. ун-та. Сер. Биология, химия, физика, математика. 2000. Вып. 3. С. 84-85.
3. Тихомирова И.С. Приложение теории катастроф к описанию упругопластической деформации материалов. Ч. 1. Изотропное тело // Тезисы докладов ВНКФ-7. С.-Пб.: С.-Пб. гос. ун-т. 2001. С. 117-119.
4. Тихомирова И.С. Приложение теории катастроф к описанию упругопластической деформации материалов. Ч. 2. Учет влияния внешних факторов // Тезисы докладов ВНКФ-7. С.-Пб.: С.-Пб. гос. ун-т. 2001. С. 119-121.
5. Тихомирова И.С. Об одном новом подходе к анализу явлений пластичности // Тезисы докладов международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Иваново: Иван. гос. ун-т. 2001. С. 46-47.
6. Maurin L. N., Tikhomirova I. S. An application of the catastrophe theory to building the model of elastic-plastic behaviour of materials. Part 1. Uniaxial deformation (stress) // cond-mat/0111304 (<http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0111304>)
7. Maurin L. N., Tikhomirova I. S. An application of the catastrophe theory to building the model of elastic-plastic behaviour of materials. Part 2. 3D model // cond-mat/0111558 (<http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0111558>)

Список цитированной литературы:

1. Николаев В.И., Шпейзман В.В. Неустойчивость деформации и разрушение при температуре жидкого гелия // ФТТ. 1997. Т. 39. № 4. С. 647-651.
2. Lebyodkin M., Dunin-Barkowski L., Brechet Y., Estrin Y., Kubin L.P. Spatio-temporal dynamics of the Portevin-Le Chatelier effect: experiment and modelling // Acta Materialia. 2000. V. 48. № 10. P. 2529-2541.
3. Жаринов В.П., Павлычев А.Н. Пластическая деформация поликристаллического бериллия при 400-800 К // Известия АН СССР. Металлы. 1991. № 1. С. 88-96.
4. Криштал М.М. Прерывистая текучесть в алюминиево-магниевого сплавах // ФММ. 1990. Т. 69. № 12. С.140-143.
5. Vinogradov A. Acoustic emission in ultra-fine grained copper // Scripta Materialia. 1998. V. 39. № 6. P. 7971-805.
6. Zong B.Y., Lawrence C.W., Derby B. Acoustic emission from a SiC reinforced Al-2618 metal matrix composite during straining // Scripta Materialia. 1997. V. 37. № 7. P. 1045-1052.
7. Kaizer J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen // Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1953. H. 1/2. S. 43-45.

Из фондов Российской национальной библиотеки

РНБ Русский фонд

2003-4

7400



Подписано в печать 21 декабря 2001 г.
Формат 60×80 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,93.
Тираж 100 экз. Заказ 483
Отпечатано на ризографе ОМТ МИБФ
153000, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

11 ЯНВ 2002