

УДК 539.374.1

К ПОСТРОЕНИЮ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

© 2011 г.

С.Е. Александров

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

sergei_alexandrov@yahoo.com

Поступила в редакцию 24.08.2011

В процессах интенсивной пластической деформации, применяемых для улучшения механических свойств материала, происходит значительное изменение размера зерен, что влечет за собой изменение предела текучести, причем при размерах зерен, достигаемых в процессах интенсивной пластической деформации, зависимость предела текучести от размера зерна не подчиняется общепринятому соотношению Холла–Петча. В связи с этим актуальной является задача построения адекватных определяющих уравнений для процессов интенсивной пластической деформации. В настоящем исследовании предлагаются кинетические уравнения для размера зерна, учитывающие общие закономерности протекания процессов интенсивной пластической деформации и основные отличительные особенности таких процессов по сравнению с традиционными процессами обработки металлов давлением. В частности, кинетические уравнения предполагают зависимость скорости изменения размера зерна от скорости вращения главных направлений тензора напряжения относительно материала. Анализируется ряд широко используемых процессов интенсивной пластической деформации для разработки экспериментальной программы определения параметров, входящих в кинетические уравнения. Использование имеющихся в литературе экспериментальных данных позволяет оценить значения некоторых параметров. Связь между размером зерна и пределом текучести устанавливается с помощью известных экспериментальных результатов для ряда материалов. При объединении этого соотношения и кинетических уравнений с классическими уравнениями теории пластического течения получена модель материала для описания процессов интенсивной пластической деформации. С использованием этой модели решены несколько модельных краевых задач. Результаты этих решений сравниваются с решениями по общепринятым моделям теории пластичности.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, размер зерна, определяющие уравнения, пластичность.

Одним из наиболее важных эффектов, которые интенсивная пластическая деформация оказывает на структуру материала, является измельчение зерна. Чтобы использовать методы механики сплошной среды для описания этого процесса, в простейшем случае необходимо установить кинетическое уравнение для среднего размера зерна и его влияние на предел текучести материала. В настоящем исследовании предполагается, что связь между средним размером зерна и пределом текучести материала известна из эксперимента, а скорость изменения среднего размера зерна зависит от текущего среднего размера зерна и эквивалентной скорости деформации, или от текущего среднего размера зерна, эквивалентной деформации и эквивалентной скорости деформации, или от текущего среднего размера зерна, эквивалентной деформации, меры вращения главных осей тензора напряжения относительно материала и эквивалентной скорости деформации.

Большое количество экспериментальных исследований показывает, что средний размер зер-

на R стремится к некоторой величине при возрастании эквивалентной деформации. Пусть R_s – такая величина размера зерна. В общем случае эта величина может зависеть от начального размера зерна R_0 . Однако во многих случаях R_s является материальной константой. Такое предположение принимается в настоящем исследовании. Простейшее предположение относительно кинетического уравнения для размера зерна состоит в том, что скорость изменения размера зерна зависит от текущего размера зерна и R_s . Таким образом,

$$\frac{dR}{dt} = -R_s f_0 \left(\frac{R}{R_s} \right) \xi_{eq}, \quad (1)$$

где t – время, f_0 – произвольная функция от R/R_s , ξ_{eq} – эквивалентная скорость деформации.

Эквивалентная деформация определяется уравнением

$$d\varepsilon_{eq} / dt = \xi_{eq}. \quad (2)$$

Возможное развитие кинетического уравнения (1) состоит в учете влияния эквивалентной

деформации на производную $dR/d\varepsilon_{eq}$. Используя (2), соответствующее обобщение уравнения (1) можно записать в виде

$$\frac{dR}{d\varepsilon_{eq}} = -R_s f_\varepsilon \left(\frac{R}{R_s}, \varepsilon_{eq} \right). \quad (3)$$

Особенности процессов интенсивной пластической деформации позволяют предположить, что вращение главных осей тензора напряжения относительно материала оказывает существенное влияние на скорость изменения размера зерна. Пусть Ω – скалярная мера вращения главных осей тензора напряжения относительно материала. В качестве такой меры может быть принят какой-либо инвариант тензора скорости вращения. В ряде практически важных процессов этот тензор имеет только одну ненулевую компоненту, ее величина может быть использована в качестве меры вращения главных осей тензора напряжения относительно материала. Обобщение уравнения (3), учитывающее влияние вращения главных осей тензора напряжения относительно материала на скорость изменения размера зерна, примет вид

$$\frac{dR}{d\varepsilon_{eq}} = -R_s f_\omega \left(\frac{R}{R_s}, \varepsilon_{eq}, \Omega \right). \quad (4)$$

Приближенный анализ процесса скручивания материала под высоким давлением позволяет вычислить эквивалентную скорость деформации, эквивалентную деформацию и меру вращения главных осей тензора напряжения относительно материала. Использование этого теоретического результата совместно с известными экспериментальными данными позволяет установить некоторые свойства функций, входящих в правые части уравнений (1), (3) и (4). Для решения краевых за-

дач, описывающих процессы интенсивной пластической деформации, эти уравнения необходимо связать с системой уравнений теории пластического течения. С этой целью используется экспериментальная зависимость между размером зерна и пределом текучести материала. Отметим, что для размеров зерна, достигаемых в процессах интенсивной пластической деформации, эта зависимость отличается от общепринятой зависимости Холла–Петча.

В рамках новой модели материала строятся обобщения некоторых классических задач теории пластичности. В частности, в качестве модельных задач рассматриваются расширение полого цилиндра внутренним давлением и расширение полого цилиндра внутренним давлением с его одновременным скручиванием касательными напряжениями, приложенными к внутреннему радиусу. Сравнение этих двух решений позволяет установить эффект меры вращения главных осей тензора напряжения относительно материала на распределение размера зерна вдоль радиуса, так как в первом случае такое вращение отсутствует. В качестве краевой задачи, имеющей прикладное значение, рассматривается обобщение классической задачи Прандтля о сжатии тонкого слоя пластического материала между параллельными шероховатыми плитами. Анализируется влияние величины удельных сил внешнего трения на распределение размера зерна по толщине слоя.

На основании выполненных исследований предлагаются некоторые конкретные виды функций, входящих в правые части уравнений (1), (3) и (4), а также экспериментальная программа для определения параметров материала, входящих в эти функции.

ON CONSTITUTIVE EQUATIONS FOR PROCESSES OF INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION

S.E. Alexandrov

Processes of intensive plastic deformation used to improve mechanical properties of material cause a significant decrease in the size of grains which leads to the corresponding change in the yield stress. And the dependence of the yield stress on the grain size does not obey the conventional Hall–Petch relation for the size of grains obtainable in processes of intensive plastic deformation. Therefore, there is an urgent need to develop adequate constitutive equations for processes of intensive plastic deformation. In the present work, evolution equations for the size of grains taking into account some general features of processes of intensive plastic deformation and the most important characteristic trends of such processes as compared to conventional metal forming processes are proposed. In particular, the evolution equations include the dependence of the rate of change of the grain size on the rate of rotation of the principal directions of the stress tensor relative to the material. A number of widely used processes of intensive plastic deformation are analyzed to develop an experimental program for determining parameters involved in the evolution equations. Using experimental data available in the literature the magnitude of some parameters is evaluated. A relation between the size of grains and the yield stress is found by means of known experimental results for several materials. Combining this relation as well as the evolution equations and the classical equations of plastic flow a material model for describing processes of intensive plastic deformation has been obtained. Using this model a few benchmark boundary value problems have been solved. The results of these solutions are compared to solutions based on conventional models of plasticity.

Keywords: intensive plastic deformation, grain size, constitutive equations, plasticity.