

ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМОВ НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ

А.О. МИКРЮКОВ, П.С. ВОЛЕГОВ

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: anto-mikryuko@yandex.ru

При нагружении металлического изделия одним из ключевых факторов, влияющих на последующее поведение материала, выступает температура, определяющая лидирующий механизм неупругой деформации. В силу этого можно классифицировать неупругие деформации на низко-, средне- и высокотемпературные. Предложенная классификация связана в первую очередь с механизмами, которые характерны для конкретных диапазонов гомологических температур (T_r). Так, для низкотемпературных деформаций (диапазоны температур $T_r \leq 0,3$ для чистых металлов и $T_r \leq 0,4$ – для сплавов) основными механизмами неупругой деформации являются термоактивируемые, такие как скольжение дислокаций и двойникование. Для среднетемпературных деформаций (в диапазоне температур $0,4 \leq T_r \leq 0,5$) характерны атермические механизмы, к которым относятся внутризеренное скольжение или межзеренное проскальзывание. К высокотемпературным деформациям (диапазон температур $T_r \geq 0,5$) относятся диффузионные механизмы, например, дислокационная ползучесть [1, 2].

В силу указанных выше причин, становится актуальной задача построения математических моделей интенсивных неупругих деформаций поликристаллов, которые позволяли бы учитывать и описывать механизмы неупругой деформации в зависимости от температуры в процессе нагружения. Целью работы является описание иерархии механизмов неупругой деформации поликристаллического материала в зависимости от скорости нагружения и температуры в рамках математической модели, с последующей численной реализацией и исследованием эволюции внутренней структуры материала при различных схемах деформирования, в том числе – соответствующим термомеханическим обработкам материала.

Для описания иерархии механизмов неупругого деформирования, которые активируются в зависимости от температурно-силового режима нагружения, в работе используется двухуровневая математическая модель неупругого деформирования, основанная на методологии физических теорий пластичности [3]. На макроуровне рассматривается представительный объем поликристаллического материала, состоящий из элементов мезоуровня – кристаллитов. Структура и соотношения модели на уровне представительного макрообъема подробно изложены, например, в [3].

Постановка модели на мезоуровне представляет собой систему уравнений, в качестве определяющего соотношения в которой выступает закон Гука в скоростной релаксационной форме (в общем случае – с учетом геометрической нелинейности, принципиально важной при описании процессов деформирования, сопровождающихся большими градиентами деформаций). Принимается гипотеза об аддитивности упругой и неупругой составляющих меры скорости деформации, в качестве таковой рассматривается транспонированный градиент относительной скорости перемещений.

В рамках модели мезоуровня принимается гипотеза об аддитивном разложении неупругой составляющей меры скорости деформации на скорости низкотемпературных \mathbf{d}_{ta}^{in} и высокотемпературных деформаций \mathbf{d}_{td}^{in} , которое представимо в виде:

$$\mathbf{d}^{in} = \mathbf{d}_{ta}^{in} + \mathbf{d}_{td}^{in}.$$

Для низкотемпературных неупругих деформаций предполагается, что основным механизмом выступает скольжение дислокаций по кристаллографическим системам скольжения, при этом скорость деформации определяются следующими соотношениями [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{d}_{ta}^{in} = \sum_{k=1}^K \dot{\gamma}_{ta}^{(k)} \mathbf{n}^{(k)} \mathbf{b}^{(k)}, \\ \dot{\gamma}_{ta}^{(k)} = \dot{\gamma}_0 \exp \left(-\frac{b^3}{2\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{G|\tau_c^{(k)} - \tau^{(k)}|}}{k_B T} \right), k = 1, \dots, K. \end{array} \right.$$

где k_B – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; G – модуль сдвига; $\tau^{(k)}$ – действующее сдвиговое напряжение; $\tau_c^{(k)}$ – критическое напряжение сдвига; b – модуль вектора Бюргера; $\dot{\gamma}_{ta}^{(k)}$ – скорость сдвига по k -й системе скольжения; $\dot{\gamma}_0$ – характерная скорость сдвига; K – количество систем скольжения для рассматриваемого типа кристаллической решетки.

Для высокотемпературных неупругих деформаций, основным механизмом которых предполагается диффузионная ползучесть, соответствующие соотношения принимают вид [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{d}_{td}^{in} = \sum_{k=1}^K \dot{\gamma}_{td}^{(k)} \mathbf{n}^{(k)} \mathbf{b}^{(k)}, \\ \dot{\gamma}_{td}^{(k)} = A_{cr} \left(\frac{\tau^{(k)}}{E} \right)^2 \exp \left(-\frac{\Delta F \left(1 - \left(\frac{\tau}{\tau_c} \right)^{(k)} \right)}{k_B T} \right), \end{array} \right.$$

где A_{cr} – коэффициент диффузионной ползучести; E – модуль упругости; ΔF – свободная энергия активации ползучести.

Выполнена серия численных экспериментов по неупругому деформированию представительного объема ОЦК поликристалла при использовании различных схем деформирования, параметров материала и температуры, результатом которых являются зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформаций, а также прочие параметры, характеризующие напряженно-деформированное состояние представительного макрообъема. Получены также значения технического предела текучести материала при различной температуре, зависимости сопротивления деформации от интенсивности накопленной деформации, а также оценен вклад каждого из конкурирующих механизмов неупругой деформации.

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

Список литературы

1. Voyiadjis G., Almasri A. A physically based constitutive model for fcc metals with applications to dynamic hardness // *Mechanics of Materials*. – 2008. – №40 (6). – pp. 549 – 563.
2. Freed A. Stress Versus Temperature Dependent Activation Energies in Creep / Freed A., Raj S., Walker K. // *J. Eng. Mater. Technol* – 1991. – 114(1). – pp. 46-50.
3. Трусов П.В., Волегов П.С., Кондратьев Н.С. Физические теории пластичности: учебное пособие. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 244 с.