

УДК 539.3;621.735.043

## ОСНОВЫ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НЕОБРАТИМЫХ ДЕФОРМАЦИЙ МЕТАЛЛОВ

© 2011 г.

*В.М. Грешнов*

Уфимский государственный авиационный технический университет

Greshnov\_VM@list.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Последовательно излагаются основы физико-математической теории необратимых деформаций металлов. Она базируется на основе экспериментально установленных положений физики прочности и пластичности, касающихся физической природы необратимых деформаций.

*Ключевые слова:* механика и физика необратимых деформаций, синтетический подход, определяющие соотношения, история нагружения.

### 1. Физические основы

1) Доминирующим механизмом деформации в достаточно широком диапазоне изменения скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  и температуры  $T$  является скольжение дислокаций в зернах.

2) Сопротивление деформации обусловлено торможением потока подвижных дислокаций барьерами, на которых они останавливаются и становятся неподвижными. Основными барьерами являются барьеры дислокационного типа: неподвижные дислокации (лес дислокаций), субзеренные, зеренные и межфазные границы. Причиной упрочнения является повышение при деформации плотности неподвижных дислокаций.

3) Разупрочнение связано с уменьшением плотности неподвижных дислокаций за счет преодоления некоторыми из них барьеров и превращения снова в подвижные (вносящими вклад в деформацию), а также за счет аннигиляции при обходе барьеров переползанием или двойным поперечным скольжением и встречи с дислокацией противоположного знака, образования новых границ зерен при рекристаллизации и микронарушений сплошности (деформационной поврежденности) дислокационными механизмами. При этом необходимую энергию для преодоления барьеров (энергию активации) неподвижные дислокации получают за счет термической активации и работы действующих напряжений.

4) Микромеханизмы перечисленных процессов разупрочнения, в основном, имеют диффузионную природу, то есть требуют диффузионной подвижности атомов, и, следовательно, высота потенциального барьера равна энергии активации самодиффузии.

### 2. Постулаты

Сформулированные положения обобщены в форме двух постулатов.

1) Необратимая деформация металлов осуществляется в условиях конкурентного протекания процессов упрочнения и разупрочнения. 2) Для неравновесного процесса необратимой деформации металлов взаимосвязь напряжения  $\sigma$ ,  $\dot{\epsilon}$  и  $T$  определяется термомеханически активируемыми микромеханизмами упрочнения и разупрочнения и описывается уравнением

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp[-(U - \tau V) / kT],$$

где  $U$  – энергия активации самодиффузии;  $\tau$  – интенсивность касательных напряжений;  $V$  – активационный объем;  $k$  – постоянная Больцмана.

Полученный на основе постулатов одноосный закон деформации имеет вид

$$\sigma_{(g)} = \sigma_{(g)}^T + d\sigma_{(g)}^u - d\sigma_{(g)}^r,$$

где  $\sigma_{(g)}$  – интенсивность напряжений на расчетном шаге  $g$  при пошаговом расчете деформации, на котором интенсивность деформации получает приращение  $d\epsilon$ ;  $\sigma_{(g)}^T$  – предел текучести на шаге  $g$ ;  $\sigma_{(g)}^u$  и  $\sigma_{(g)}^r$  – приращения  $\sigma_{(g)}$  за счет процессов упрочнения и разупрочнения соответственно.

Обобщить скалярный закон деформации на объемное напряженно-деформированное состояние на основе принципов классической теории невозможно. Они не учитывают наличие процесса термодинамического возврата и историю нагружения. Принципы новой теории сформулированы в форме двух теорем, которые являются обобщениями постулата Драккера и принципа максимума Мизеса, и доказываются с привлечением постулатов теории.

### 3. Теоремы

1. Работа добавочных напряжений на вызванных ими приращениях необратимых деформаций вязкопластического тела за цикл нагружения и термодинамического возврата на шаге нагружения  $g$  положительна

$$(\sigma_{ij(g)}^T - d\sigma_{ij(g)}^r) d\epsilon_{ij(g)} + d\sigma_{ij(g)}^u d\epsilon_{ij(g)} > 0.$$

**Следствие.**  $d\sigma_{ij(g)}^u / d\epsilon_{ij(g)} > 0$  – условие устойчивости деформирования для напряжений  $\sigma_{ij(g)}^u$ .

2. При любом заданном значении компонент приращения необратимой деформации на шаге нагружения  $g$  вязкопластического тела приращение работы необратимой деформации имеет максимальное значение для действительного напряженного состояния, определяемого историей нагружения ( $\dot{\epsilon}(t)$ ,  $T(t)$ , где  $t$  – время) и действительными на шаге значениями  $\dot{\epsilon}_{(g)}$  и  $T_{(g)}$  по сравнению со всеми возможными напряженными состояниями с той же историей нагружения, допускаемыми мгновенной функцией нагружения  $f_{(g)}$  и удовлетворяющими условию

$$f_{(g)}^*(\sigma_{ij(g)}^{T*}, d\sigma_{ij(g)}^{u*}, d\sigma_{ij(g)}^{r*}) < f_{(g)}(\sigma_{ij(g)}^T, d\sigma_{ij(g)}^u, d\sigma_{ij(g)}^r),$$

когда  $\dot{\epsilon}_{(g)}^* < \dot{\epsilon}_{(g)}$  и (или)  $T_{(g)}^* > T_{(g)}$ , то есть

$$(\sigma_{ij(g)}^{T*} - d\sigma_{ij(g)}^{r*} + d\sigma_{ij(g)}^{u*}) d\epsilon_{ij(g)} > (\sigma_{ij(g)}^T - d\sigma_{ij(g)}^r + d\sigma_{ij(g)}^u) d\epsilon_{ij(g)}$$

– принцип максимума новый.

### 4. Обобщенный закон течения

С использованием введенных для вязкопластического тела понятий процесса термодинамического возврата и мгновенной на шаге  $g$  функции нагружения, которая для вязкопластического тела не имеет отрицательных значений, и доказанных теорем ассоциированный закон течения в физико-математической теории необратимых деформаций получен в виде

$$d\epsilon_{ij(g)} = \frac{3}{2} \frac{d\epsilon_{(g)}}{\sigma_{(g)}^T + d\sigma_{(g)}^u - d\sigma_{(g)}^r} \times (s_{ij(g)}^T + ds_{ij(g)}^u - ds_{ij(g)}^r),$$

где  $\sigma_{(g)}^T$ ,  $d\sigma_{(g)}^u$ ,  $d\sigma_{(g)}^r$  рассчитываются на каждом расчетном шаге  $g$  по одноосному оператору теории. Это модель деформации нелинейного вязкопластического тела, которое является обобщенным телом. Из нее, как частные случаи, следуют модели идеально пластического, линейно вязкого, упрочняющегося тела с «падающей» диаграммой деформирования. Для решения практических задач закон течения удобно использовать в форме трех уравнений:

$$d\epsilon_{ij(g)} = \frac{3}{2} \frac{d\epsilon_{(g)}}{\sigma_{(g)}^T} s_{ij(g)}^T; \quad d\epsilon_{ij(g)} = \frac{3}{2} \frac{d\epsilon_{(g)}}{d\sigma_{(g)}^u} ds_{ij(g)}^u; \\ d\epsilon_{ij(g)} = \frac{3}{2} \frac{d\epsilon_{(g)}}{d\sigma_{(g)}^r} ds_{ij(g)}^r.$$

Систему уравнений краевой задачи физико-математической теории пластичности следует замыкать вторым уравнением, так как оно, согласно следствию из теоремы 1, удовлетворяет условию устойчивости.

## FUNDAMENTALS OF THE PHYSICAL AND MATHEMATICAL THEORY OF IRREVERSIBLE DEFORMATION OF METALS

V.M. Greshnov

The basics of physical and mathematical theory of irreversible deformation of metals is consistently introduces. It is based on the postulates formulated on the basis of experimentally determined statements of physics of strength and plasticity on the physical nature of irreversible deformation.

**Keywords:** mechanics and physics of irreversible deformation, a synthetic approach, constitutive equations, history of loading.