

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕФЕКТНЫХ СТРУКТУР В ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

[В. И. Владимиров], И. А. Овидько

В процессе пластического деформирования твердых тел (ТТ) наблюдаются пространственно-временные организации дефектных структур [1, 2], которые типичны для сильно неравновесных систем [3, 4]. Обычно имеет место локальная потеря устойчивости дислокационными конфигурациями и дислокационными потоками, которая сопровождается локальными изменениями скорости пластической деформации и латентной энергии ТТ. Для описания пластических неустойчивостей, обусловленных закономерностями поведения дефектов, первостепенный интерес представляет выявление общих критериев эволюции дефектных структур и их устойчивости относительно изменений параметров пластической деформации. В настоящей работе законы эволюции дефектных структур в пластически деформируемых ТТ обсуждаются в рамках нелинейной неравновесной термодинамики.

В случае справедливости гипотезы локального равновесия (подтверждаемой для пластически деформируемых ТТ оценками [5] равенство баланса локальной энтропии s при пластической деформации ТТ имеет следующий вид [6, 7]:

$$\dot{s} + \text{div } \mathbf{J}_s = \dot{\alpha} = \mathbf{J}_q \text{ grad } (T^{-1}) + \chi^d, \quad (1)$$

где поток энтропии $\mathbf{J}_s = T^{-1} \mathbf{J}_q$ пропорционален потоку тепла \mathbf{J}_q ; T — абсолютная температура; точка над символом означает дифференцирование по времени; χ^d — производство локальной энтропии, определяемое диссипацией дефектами работы пластической деформации. При квазистатической деформации температурные неоднородности обычно невелики и поэтому вкладом $\mathbf{J}_q \text{ grad } (T^{-1})$ в производство энтропии χ можно пренебречь [6].

Рассмотрим подробно структуру χ^d . Элементарная работа внешних сил δW при пластической деформации ТТ частью сразу диссипируется в тепло при движении дефектов-переносчиков пластической деформации, а частью расходуется на накопление латентной энергии образца. Последняя, представляющая собой энергию однородных упругих искажений (не связанных с дефектами), энергию ядер дефектов и их полей напряжений, также способна частично переходить в тепло при перестройках дефектных структур. Например, процессы аннигиляции дефектов, образования дислокационных субграниц и других низкоэнергетических дислокационных конфигураций сопровождаются уменьшением энергии ансамбля дефектов, диссипируемой при этом в тепло. Учитывая два этих канала диссипации работы пластической деформации, получаем следующее выражение для производства энтропии:

$$\chi^d = T^{-1} \sigma_{ik} [\alpha \dot{\varepsilon}_{ik}^p + \beta \dot{\varepsilon}_{ik}^l]. \quad (2)$$

Здесь σ_{ik} — тензор локальных напряжений; $\dot{\varepsilon}_{ik}^p$ ($\dot{\varepsilon}_{ik}^l$) — тензор скорости локальной пластической (упругой соответственно) деформации; коэффициент α характеризует долю работы пластической деформации, сразу переходящей в тепло; коэффициент β характеризует долю латентной энергии, переходящей в тепло при перестройках дефектных структур. В (2) σ_{ik} есть термодинамическая сила, а $J_{ik} = T^{-1} (\alpha \dot{\varepsilon}_{ik}^p + \beta \dot{\varepsilon}_{ik}^l)$ есть термодинамический поток.

Представление (2) величины x^d как квадратичной формы потока и силы характерно для производства энтропии в неравновесных системах [3, 4] и позволяет в рамках подхода [3, 4] получить следующий общий термодинамический критерий пластически деформируемого ТТ (в случае неизменности во времени граничных условий):

$$\int_V \frac{d_\sigma x^d(x)}{dt} d^3x = \int_V \dot{\sigma}_{ik}(x) T^{-1}(x) [\alpha_{ik}^{\dot{\sigma}}(x) + \beta_{ik}^{\dot{\sigma}}(x)] d^3x \leq 0, \quad (3)$$

t — время; V — объем системы; $d_\sigma x^d$ — дифференциал x^d , связанный с изменением производства энтропии x^d при изменении σ_{ik} . Критерий (3) утверждает, что изменение термодинамической силы — тензорного поля локальных напряжений $\sigma_{ik}(x)$ — протекает всегда так, чтобы уменьшить величину производства энтропии $\int_V x^d(x) d^3x$.

Согласно принципам неравновесной термодинамики [3, 4], в пластически деформируемых ТТ, являющихся неравновесными нелинейными системами, возможно формирование стационарных неравновесных состояний — диссипативных дефектных структур, характеризующихся постоянными во времени полями $\sigma_{ik}(x)$ и $J_{ik}(x)$. Достаточное условие устойчивости стационарного неравновесного состояния есть следующее из (2), (3) условие

$$\int_V \delta\sigma_{ik}(x) \delta J_{ik}(x) d^3x \geq 0, \quad (4)$$

где $\delta A = A - A_0$ — отклонение локальной величины A от ее значения A_0 в стационарном состоянии, исследуемом на устойчивость. Поскольку общее термодинамическое условие (4) является только достаточным, его нарушение свидетельствует однозначно не о потере устойчивости существующей дефектной структурой, а только о возможности такой потери. Выявление конкретного типа неустойчивости и вычисление критических параметров системы обычно проводятся в рамках метода нормальных мод [3, 4].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Панин В. Е., Ляхачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. М.: Наука, 1985. 230 с.
- [2] Владимиров В. И., Романов А. Е. Дисклинация в кристаллах. Л.: Наука, 1986. 224 с.
- [3] Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. 280 с.
- [4] Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985. 328 с.
- [5] Wallace D. C. // Phys. Rev. B. 1980. V. 22. N 4. P. 1477—1486.
- [6] Beghi M. // Nuovo Cimento D. 1982. V. 1. N 6. P. 778—788.
- [7] Beghi M., Bottani C. E., Caglioti G. // Res. Mech. 1986. V. 19. N 3. P. 365—379.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
28 октября 1983 г.