

01; 05.3

© 1992

К ВОПРОСУ О СНИЖЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НАЧАЛА  
ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

С.И. Медников, Д.М. Гуреев

Известно, что температура начала  $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения в сталях ( $A_1$ ) снижается после их пластического деформирования [1, 2]. Анализ, проведенный в работах [1, 2], объясняет эффект возможной релаксацией части энергии наклепа в процессе фазового превращения, вследствие чего равенство термодинамических потенциалов фаз, определяющее температуру фазового равновесия, достигается при меньших температурах. Для величины энергии наклепа  $\Delta U/\Delta T$ , релаксация которой приводит к снижению температуры  $A_1$  на один градус, известно следующее выражение [1, 2]:

$$\frac{\Delta U}{\Delta T} = \Delta S, \quad (1)$$

где  $\Delta S$  — энтропия фазового превращения. Применение данного выражения к анализу экспериментальных данных дает качественное объяснение последних [2]. Однако с точки зрения количественного согласия экспериментальное значение  $\Delta U/\Delta T \approx 5.6$  Дж/моль·град [1] на порядок величины превышает энтропию фазового превращения  $\Delta S$ . Такое различие в значениях  $\Delta U/\Delta T$  и  $\Delta S$  ставит под сомнение справедливость анализа, на основании которого получено выражение (1).

Целью данной работы является анализ физических причин, приводящих к снижению температуры фазового равновесия при пластической деформации стали, и применение полученных результатов к расчету величины  $\Delta U/\Delta T$ .

В работах [3, 4] предложена и обоснована концепция о предельном состоянии вещества в точке фазового перехода. Здесь под предельным понимается такое состояние, которое характеризуется максимально возможной запасенной энергией, вследствие чего любое увеличение последней приводит к перестройке кристаллической решетки. В качестве меры запасенной энергии нами предлагается использовать дилатацию решетки на том основании, что дилатация, так же как и запасенная в решетке энергия, является простой однозначной функцией температуры. То, что именно дилатация является мерой запасенной в решетке энергии, следует также из электронной теории твердых тел, согласно которой энергия решетки при заданном электронном строении определяется параметром решетки — дилата-

цией. В результате в качестве условия начала фазового превращения при температуре  $T < A_1$  можно положить равенство дилатаций решетки при этих температурах

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{A_1}. \quad (2)$$

На справедливость результата (2) указывают, в частности, данные [5], согласно которым превращение аустенита в мартенсит всегда начинается при постоянной величине параметра решетки аустенита ( $a = 3.61 \text{ \AA}$ ). Из выражения (2) следует

$$-\beta \Delta T + \varepsilon_d = 0. \quad (3)$$

Здесь  $\beta$  - линейный коэффициент термического расширения,  $\Delta T = A_1 - T$ ,  $\varepsilon_d$  - дилатация решетки вследствие пластической деформации. Для  $\varepsilon_d$  известно следующее выражение [6]

$$\varepsilon_d = \frac{1}{2} \rho b^2, \quad (4)$$

где  $\rho$  - плотность дислокаций;  $b$  - вектор Бюргерса. Физический смысл выражения (3) состоит в том, что часть термической дилатации решетки компенсируется разрыхлением последней вследствие пластической деформации. Из (3), (4) с учетом известного выражения для энергии наклепа  $\Delta u = \rho b^2 \lambda V / 2$  [6], где  $\lambda$  - модуль сдвига,  $V$  - удельный объем, получаем

$$\frac{\Delta u}{\Delta T} = \beta \lambda V. \quad (5)$$

Используя известные значения  $\lambda = 5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ ,  $V = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ,  $\beta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$  [2, 7], вычислим  $\Delta u / \Delta T \approx 7 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}$ . Сопоставление вычисленного и экспериментального [1] значений  $\Delta u / \Delta T$  показывает, что они хорошо согласуются друг с другом.

Оценим максимально возможную величину смещения температуры фазового равновесия за счет пластической деформации. Из (3) следует

$$\Delta T = \frac{1}{2} \rho b^2 \beta^{-1}. \quad (6)$$

Подставив в (6) характерные значения  $\rho = (2-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (предельная плотность дислокаций при пластической деформации),  $b^2 = 10-15 \text{ см}^2$ ,  $\beta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ , получаем  $\Delta T = (50-100) \text{ К}$ , что находится в согласии с экспериментальными данными [1, 2].

Применим развитый подход к сравнительному анализу  $\alpha$ - $\gamma$ -превращения в железе и стали. Согласно работе [8] снижение температуры  $A_1$  с  $910^\circ\text{C}$  в железе до  $725^\circ\text{C}$  в стали можно объяснить контактным взаимодействием на границах феррит-карбид. В этом

случае аналогично (3) можно рассчитать величину контактной дилатации  $\mathcal{E}_k$ .

$$\mathcal{E}_k = \beta \Delta T \quad (7)$$

Используя значения  $\Delta T = 185$  К,  $\beta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ , получаем  $\mathcal{E}_k \approx 4 \times 10^{-3}$ , что даже меньше экспериментально установленной дилатации несоответствия на границе феррит-карбид [8].

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Фазовая перестройка решетки происходит по достижении предельной плотности запасенной энергии. Снижение температуры  $A_1$  в стали после пластической деформации обусловлено достижением предельной плотности энергии при меньшей температуре за счет ее частичной компенсации энергией наклепа.

2. Энергия наклепа  $\Delta U / \Delta T$ , релаксация которой необходима для снижения температуры  $A_1$  на один градус, определяется произведением коэффициента линейного термического расширения, модуля сдвига и удельного объема.

3. В рамках развитого подхода снижение температуры  $A_1$  в стали по отношению к температуре  $A_1$  в железе можно объяснить влиянием контактной дилатации несоответствия на границе феррит-карбид, расчетное значение которой составляет  $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ .

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Гриднев В.Н., Мешков Ю.Я., Ошкадеров С.П., Трефилов В.И. Физические основы электротермического упрочнения стали. Киев: Наукова Думка. 1973. 334 с.
- [2] Дьяченко С.С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах. М.: Металлургия. 1982. 127 с.
- [3] Осипов К.А. Некоторые активируемые процессы в твердых металлах и сплавах. М.: Наука 1962. 130 с.
- [4] Осипов К.А. Новые идеи и факты в металловедении. М.: Наука. 1986. 70 с.
- [5] Лысак Л.И., Николлин Б.И. Физические основы термической обработки стали. Киев: Техника, 1975. 303 с.
- [6] Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир. 1967. 640 с.
- [7] Кикоин И.К. Таблицы физических величин. Справочник. М.: Атомиздат. 1976. 1008 с.
- [8] Залкин В.М. // Металловедение и термическая обработка металлов, 1987. № 1. С. 19-24.

Физический институт  
им. П.Н. Лебедева  
РАН, Самарский филиал

Поступило в Редакцию  
30 декабря 1991 г.