

УДК 621.771.01

А.С.Бутин (6 курс, каф. ПОМ), Н.Г.Колбасников, д.т.н., проф.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСЛОВИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ А.Ю.ИШЛИНСКОГО ДЛЯ ОПИСАНИЯ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Мартенситное превращение (МП), как и пластическая деформация (ПД), имеет сдвиговый кооперативный характер. Различие между ними состоит в том, что ПД развивается под действием напряжений, приложенных извне, а МП – под действием собственных внутренних напряжений. Последние обусловлены присутствием дефектов кристаллического строения, расположение которых по объему составляет дефектную структуру металла. Мерой структурного состояния металла является структурная энтропия  $\Delta S_{стр}$ , которая может быть определена при помощи плотности распределения вероятностей пределов текучести  $f(\tau)$ :  $\Delta S_{стр} = -R \int f(\tau) \ln f(\tau) d\tau$ . Выражение

$$\frac{\rho T_0}{\mu} \Delta S_{стр} = \sigma_s, \quad (1)$$

где  $\rho$  и  $\mu$  – плотность и молярная масса металла,  $T_0$  – температура, при которой определена структурная энтропия, задает соотношение между структурой и уровнем внутренних напряжений (пределом текучести). При этом  $\Delta S_{стр} = \Delta S_M + \Delta S_{лег} + \Delta S_{ф.п.} + \Delta S_{стр}(\epsilon)$ , где  $\Delta S_M$  – характеризует структуру матричного металла;  $\Delta S_{лег}$  – определяет вклад легирования в изменение структуры;  $\Delta S_{ф.п.}$  – вклад фазовых превращений;  $\Delta S_{стр}(\epsilon)$  – вклад пластической деформации.

Таким образом, при охлаждении ниже равновесной температуры фазового превращения, в металле возрастают внутренние напряжения (фазовый наклеп) на величину:

$$\Delta \sigma_{ф.п.0} = \frac{\rho T_0}{\mu} \Delta S_{ф.п.} \quad (2)$$

Если быстрым охлаждением подавить релаксационные диффузионные процессы, то напряжения (1) и (2) растут с изменением модуля упругости:

$$\sigma_s(T) = \sigma_{s0} \left( \frac{E_i}{E_{ф.п.}} \right)^{\frac{1}{1-\beta}}, \quad (3)$$

где  $E_{ф.п.}$  и  $E_i$  – модуль упругости при температуре  $T=T_{ф.п.}$  и  $T_i < T_{ф.п.}$ ,  $\sigma_{s0}$  – напряжения (1) при  $T=T_{ф.п.}$ ,  $\beta$  – коэффициент аппроксимации зависимости  $\sigma(\epsilon) = \sigma_{T0} + \alpha \epsilon^\beta$ .

Мартенситное превращение сопровождается образованием новой межфазной границы с удельной энергией  $\gamma'_s$ , которая зависит от температуры,  $\gamma'_s = \gamma'_{s0} E_i / E_{ф.п.}$ . Для образования новой границы требуются напряжения  $\sigma_{гр} = \gamma'_s / a_{гр}$ , где  $a_{гр}$  – среднее межатомное расстояние на новой границе. В связи с этим началом МП можно считать условие:

$$\sigma_{s0} \left( \frac{E_i}{E_{ф.п.}} \right)^{\frac{1}{1-\beta}} \geq \frac{\gamma'_s}{a_{гр}} \frac{E_i}{E_{ф.п.}}. \quad (4)$$

Напряжения  $\sigma_s(T)$  для изотропной среды можно считать гидростатическими. При этом для определения начала сдвигового процесса МП можно использовать условие пластичности Ишлинского:

$$\max \left\{ \left| \sigma_1(T) - \sigma_{cp}(T) \right|; \left| \sigma_2(T) - \sigma_{cp}(T) \right|; \left| \sigma_3(T) - \sigma_{cp}(T) \right| \right\} = \frac{2}{3} \sigma_T(T), \quad (5)$$

где  $\sigma_{cp} = \sigma_s$ . Условие (5) может быть записано в деформациях при  $\varepsilon = \sigma/E$ :

$$\max \left\{ \left| \varepsilon_1(T) - \varepsilon_{cp}(T) \right|; \left| \varepsilon_2(T) - \varepsilon_{cp}(T) \right|; \left| \varepsilon_3(T) - \varepsilon_{cp}(T) \right| \right\} = \frac{2}{3} \varepsilon_{гр}(T). \quad (6)$$

Предположим, что (6) справедливо и для анизотропных сред. Тогда для кристаллографических направлений  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 100 \rangle$  условие (6) можно представить как:

$$\max \left\{ \left| \varepsilon_{\langle 111 \rangle}(T) - \varepsilon_{cp}(T) \right|; \left| \varepsilon_{\langle 110 \rangle}(T) - \varepsilon_{cp}(T) \right|; \left| \varepsilon_{\langle 100 \rangle}(T) - \varepsilon_{cp}(T) \right| \right\} = \frac{2}{3} \varepsilon_{гр}(T), \quad (7)$$

$$\text{где } \varepsilon_{cp}(T) = \frac{\sigma_{cp}(T)}{E_{cp}(T)}; \quad \varepsilon_{\langle 111 \rangle} = \frac{\sigma_{cp}(T)}{E_{\langle 111 \rangle}(T)}; \quad \varepsilon_{\langle 110 \rangle} = \frac{\sigma_{cp}(T)}{E_{\langle 110 \rangle}(T)}; \quad \varepsilon_{\langle 100 \rangle} = \frac{\sigma_{cp}(T)}{E_{\langle 100 \rangle}(T)}.$$

Для большинства металлов анизотропия упругих свойств велика, например, для  $\alpha$ -Fe  $E_{\langle 111 \rangle} = 284$  ГПа,  $E_{\langle 110 \rangle} = 222$  ГПа,  $E_{\langle 100 \rangle} = 132$  ГПа. Величина барьера превращения зависит от значения коэффициента Пуассона  $\nu$  и энергии, образующейся при превращении границы:

$$\varepsilon_{гр} = \frac{k}{8\pi(1-\nu^2)}, \quad \text{где } k = \gamma'_s / \gamma_s, \quad \text{где } \gamma_s - \text{удельная энергия свободной поверхности.}$$

Расчет температур начала  $M_H$  и конца  $M_K$  мартенситного превращения показал хорошую сходимость с экспериментальными данными. Можно полагать, что действительными причинами МП являются критические значения внутренних напряжений и анизотропия упругих свойств кристаллической решетки.

Рассмотренный подход к описанию МП позволяет численно определить влияние многих факторов и объяснить такие явления, как стабилизация аустенита в сталях при остановке охлаждения, как влияние упругих напряжений и пластической деформации, как температурный гистерезис, а также позволяет трактовать МП как релаксационное явление.