

# РАСЧЕТ ОБРАТИМОЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ПРИ ПРОСТОМ И СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ ПОСРЕДСТВОМ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Волков А.Е, Михайлова С.В.

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

[volkov@math.spbu.ru](mailto:volkov@math.spbu.ru)

Разработана простая макроскопическая феноменологическая модель для расчета обратимой (обусловленной фазовым превращением) деформации сплава с памятью формы. Модель содержит две внутренние переменные – объемную долю мартенсита  $\Phi$  и девиатор средней фазовой деформации  $\Lambda_{ij}$ . Обобщенные термодинамические силы  $F_\Phi$  и  $F_{\Lambda_{ij}}$ , вызывающие изменения этих переменных рассчитываются как производные от потенциала Гиббса  $G$

$$F_\Phi = -\frac{\partial G}{\partial \Phi} = -\frac{q_0}{T_0}(T - T_0) + I\sigma_{kk} + dev\sigma_{ij}\Lambda_{ij} - \frac{\partial G^{mix}}{\partial \Phi},$$

$$F_{\Lambda_{ij}} = -\frac{1}{k_\Phi} \frac{\partial G}{\partial \Lambda_{ij}} = \frac{1}{k} \left( dev\sigma_{ij} - \frac{1}{\Phi} \frac{\partial G^{mix}}{\partial \Lambda_{ij}} \right),$$

где  $T$  – температура,  $\sigma_{ij}$ ,  $dev\sigma_{ij}$  – тензор и девиатор напряжения,  $T_0$  – температура термодинамического равновесия фаз,  $q_0$ , – скрытая теплота превращения,  $I$  – объемный эффект превращения,  $k$  – константа материала,  $G^{mix}$  – часть потенциала Гиббса, задающая энергию взаимодействия фаз. Для этой энергии предложено выражение:

$$G^{mix} = \frac{1}{2} a \left( \Phi^2 + b\Phi \frac{\Gamma_A^2 \Gamma_D^{2\alpha}}{(\Gamma_D^2 - \Gamma_A^2)^a} \right).$$

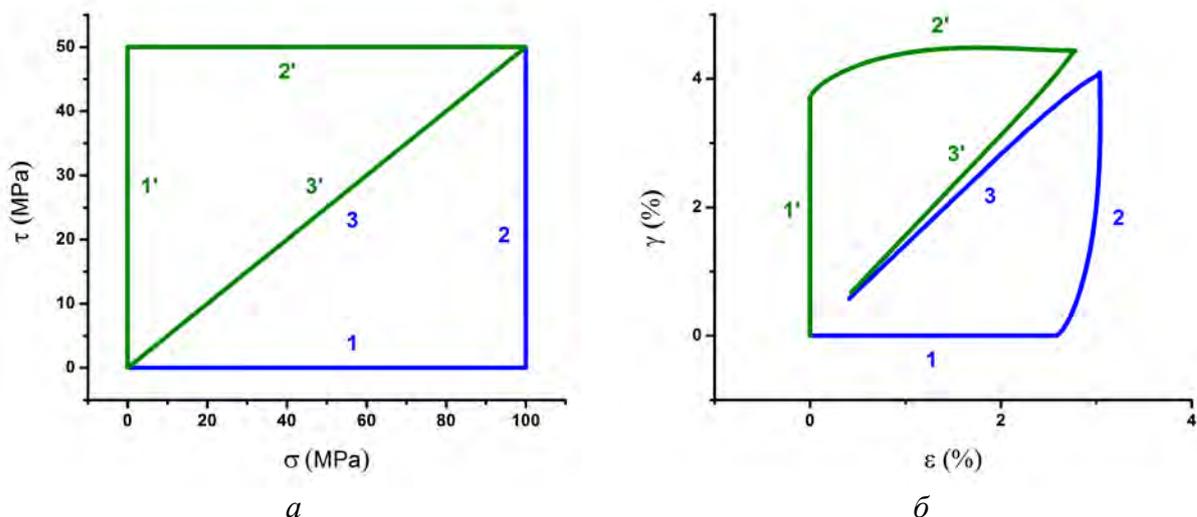
Любое преобразование аустенита в мартенсит или/и переориентация мартенсита рассматривается как перемещение в пространстве внутренних переменных. Предполагается, что приращения переменных  $\Phi$  и  $\Lambda_{ij}$  пропорциональны силам  $F_\Phi$  и  $F_{\Lambda_{ij}}$ , а условием превращения является равенство

$$\sqrt{F_\Phi^2 + \|F_\Lambda\|^2} = F^{fr},$$

где  $F^{fr}$  – константа материала, имеющая смысл силы сопротивления, действие которой аналогично действию силы трения. Его расчет производится на основе единого условия, сформулированного в терминах обобщенных термодинамических сил.

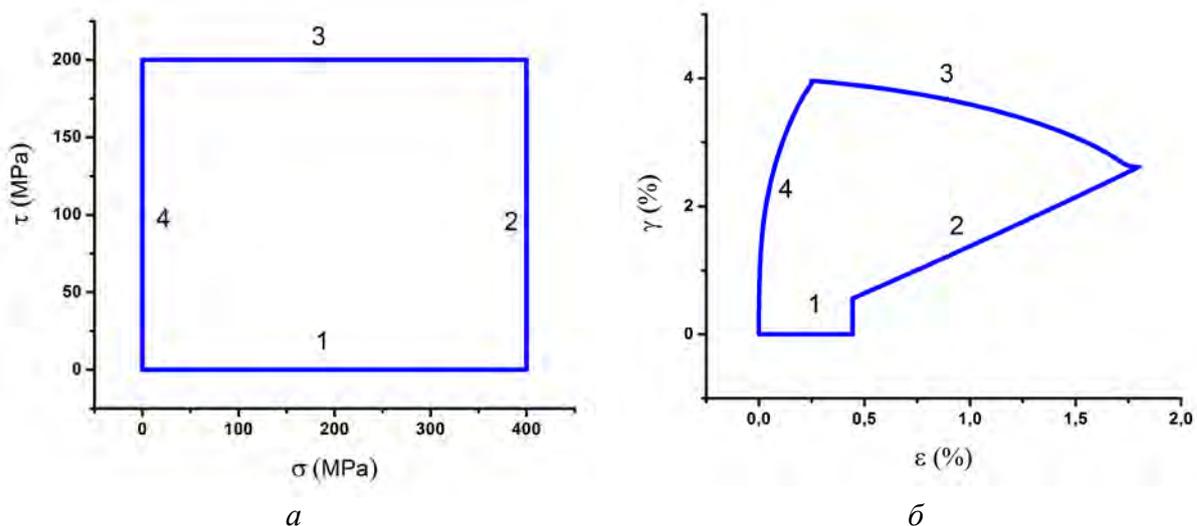
Значения констант  $F^{fr}$  и  $a$  определяются по характеристическим температурам превращения, константы  $k$  – по значению фазового предела текучести материала в мартенситном состоянии.

Результаты расчета показывают, что для нагружения в условиях одноосного растяжения предлагаемая модель качественно правильно описывает все основные деформационные эффекты: активное деформирование в аустенитном и мартенситном состояниях, эффекты пластичности превращения и памяти формы, эффект генерации напряжения. Выполнено моделирование деформации при нагружении по различным траекториям в пространстве напряжений, показанным на рис. 1а и при последующем нагреве. Траектория возврата деформации (участок 3) представляет собой прямую линию, что находится в соответствии с известными экспериментальными данными [1].



**Рис. 1.** Траектории нагружения в пространстве напряжений (1–2 и 1'–2') в мартенситном состоянии, нагрев (3 и 3') (а) и соответствующие им траектории в пространстве деформаций (б).

Траектория деформирования материала в псевдоупругом состоянии, соответствующая нагружению по замкнутой траектории (рис.2а), показана на рис.2б.



**Рис. 2.** Траектории нагружения в псевдоупругом состоянии в пространстве напряжений (а, 1–2–3–4) и соответствующая траектория в пространстве деформаций (б).

Данная траектория качественно соответствует экспериментально наблюдаемой траектории, полученной в работе [2]. В частности, на участке 2 в процессе увеличения касательного напряжения происходит одновременный рост как сдвиговой, так и осевой деформации. Аналогичный характер одновременного изменения обеих компонент деформации при изменении только нормального напряжения имеет место на участке 3.

#### Список литературы

1. Беляев С.П., Каменцева З.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Тошпулатов Ч.Х. Эффект памяти формы при сложном нагружении. Проблемы прочности, 1987, №6. – С. 81–84
2. Sittner P., Hara Y., Tokuda M. Experimental study on the thermoelastic martensitic transformation in shape memory alloy polycrystal induced by combined external forces. Metallurgical and Material Transactions A, vol. 26A (1995), 2923–2935.