УДК 539.373

ВЛИЯНИЕ НЕОРИЕНТИРОВАННЫХ МИКРОНАПРЯЖЕНИЙ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ДЕФЕКТНОЙ И МАРТЕНСИТНОЙ ПРИРОДЫ

И.М. Голиборода

Государственный университет "Львiвська Политехника",
79013 Украина, Львов, Ст.Бандеры 12,
E-mail: iholybor@polynet.lviv.ua

В последнее время интенсивно исследуется взаимовлияние деформационных процессов дефектного и мартенситного происхождения, которое часто проявляется при предобработке и эксплуатации сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) и имеет достаточно сложный характер [1]. В частности, важную роль играют остаточные микронапряжения различной природы (как ориентированные, так и неориентированные).

В предлагаемой работе данная проблема рассматривается в рамках иерархической двухуровневой феноменологической модели, построенной в терминах ряда положений концепции скольжения [2]. В основе упомянутой концепции лежит предположение о сдвиговом характере деформации, проходящей на нижнем структурном уровне модели.

В упомянутой модели величина деформации полагается зависимой от перемещения плоскостей пятимерного пространства девиаторов Ильюшина; каждой указанной плоскости отвечает определенная система скольжения. Так же, как и в концепции Б.Будянского[2], считается, что указанная система скольжения является единственно возможной для каждого выделенного объема, который отвечает нижнему уровню модели. Также полагаем, что при нагружении отдельные кристаллические элементы не взаимодействуют между собой; поликристаллический характер среды отображается различной ориентацией выделенных объемов и, соответственно, систем скольжения и соответствующих плоскостей девиаторного пространства.

На нижнем уровне модели выделенный объем рассматривается как представительский элементарный объем, по которому проводится усреднение. Представительский характер выделенного объема предполагает, что его характеристики сами по себе являются результатом определенного усреднения по отдельным элементам меньшего масштаба, поэтому в дальнейшем для характеристики данного объема будем использовать термин "мезообъем" [3].

Плоскости девиаторного пространства перемещаются самопараллельно, величина перемещения характеризует элементарный акт деформации. В рассматриваемом совмещенном пространстве напряжений и деформаций компоненты векторов напряжений известным образом определяются через компоненты соответствующих девиаторов. [4].

Поскольку основные положения модели неоднократно рассматривались ранее [5-6], далее ограничимся самой общей характеристикой подхода и будем останавливаться только на моментах, касающихся дальнейшего развития и применения модели на данном этапе исследований. Пояснения приводятся лишь для тех обозначений, которые не рассматривались в предшествующих публикациях [5-6].

При описании необратимой деформации дефектной природы в переменном температурно-силовом поле на нижнем структурном уровне модели может быть применена формула

$$d\Psi = d\varphi - K_0(T,S)(\Psi - \Psi^0)dt\,. \qquad (1)$$

В такой постановке φ – интенсивность необратимой деформации (величина, которая определяется смещением плоскостей относительно начального положения и задается в объеме, который определяется нормалью $\overline{M}$); Ψ – интенсивность упрочнения или интенсивность дефектов (величина, однозначно связанная с положением плоскостей 5-мерного пространства – считается, что плоскости со временем могут возвращаться в исходное положение); Ψ^0 – интенсивность дефектов (дислокаций), ставших неподвижными вследствие быстрого снижения температуры ($\Psi^0 \le \Psi$). Соотношения, определяющие закономерности изменения параметра Ψ^0, "ответственного" за явление температурного упрочнения [3], детально рассмотрены в [7]. В терминах соотношения (1) может быть описана "мгновенная" пластическая деформация и ползучесть.

Интенсивность дефектов может быть задана в виде:

$$\Psi = a((H_M / \sqrt{2/3}\sigma_p(T))^2 - 1 - c_1 I_M - c_2 R_M + c_3 f_M)\,, \qquad (2)$$

где $a, c_1, c_2, c_3 = const$. Результирующее расстояние до плоскости с нормалью $\overline{M}$ $H_M = (\vec{S}, \vec{M})$.

Величины I_M и R_M описывают действие так называемых ориентированных микронапряжений в плоскости с нормалью $\overline{M}$. Указанные микронапряжения возникают вследствие неполного совмещения кристаллических решеток смежных фаз при механомартенситном преобразовании [8] и являются соответственно способными и неспособными к релаксации. Они могут быть определены из соотношений:

$$dI_M = r_1 d[(\vec{S}, \vec{M})] - h(T) I_M dt;\ I_M \equiv |I_M|\,; \qquad (3)$$

$$dR_M = r_2 d[(\vec{S}, \vec{M})] \text{ при } dR_M \ge 0\,; \quad dR_M = 0 \text{ при } R_M < 0\,;$$

$r_1 = a_l (c_r + d_r \varepsilon_g)^{-1}$; $r_2 = a_r (c_r + d_r \varepsilon_g)^{-1}$; $a_i, a_r, c_r, d_r = const$; $\varepsilon_g = \int (|d\varepsilon_m| / ds) ds$ – длина пути интегрирования по мартенситному каналу.

Величина f_M отвечает действию так называемых неориентированных микронапряжений, возникающих в переменном температурном поле как результат проявления различных факторов, в том числе вследствие анизотропии коэффициентов теплового расширения смежных фаз [3]. Они могут быть определены согласно [7]:

$$df_M = r_3 (\vec{S}, \vec{M}) dT - p(S) f_M dt \text{ при } df_M \ge 0\,; \quad df_M = 0 \text{ при } f_M < 0\,; \qquad (4)$$

$$r_3 = b_f (c_f + d_f \varepsilon_g)^{-1};\ b_f, c_f, d_f = const\,.$$

В соотношении (2) параметр σ_p – напряжение начала необратимых формоизменений при растяжении. В данной работе мы различаем два понятия – предел необратимых формоизменений и предел пластичности; под последним понимается напряжение начала формоизменений при достаточно интенсивном нагружении с учетом скоростных эффектов и предшествующих циклических испытаний. Напряжение начала формоизменений может быть представлено в виде:

$$\sigma_p = \sigma^i_p(T) + \sqrt{2/3}z_2 \frac{M_s^d - T}{M_s^d - M_s}[\frac{\Phi(M_s - M_f)}{K} H(S - S_p)H(S_o - S) +$$

$$+\frac{\Phi_{\max}(M_s - M_f)}{K} H(S - S_o)] \qquad i = 1, 2, 3. \tag{5}$$

В свою очередь $\sigma^i_p(T)$ – предел необратимых формоизменений для материала в аустенитном состоянии. Данный параметр задается в виде:

$$\sigma_p = \sigma^1_p = z_1 S_p \qquad \text{при } M_s \le T \le M_s^\sigma;$$

$$\sigma_p = \sigma^2_p = z_1 K^{-1} \frac{M_s^\sigma - M_s}{T_{ml} - M_s^\sigma}(T_{ml} - T) \qquad \text{при}: M_s^\sigma \le T \le T_{con}; \tag{6}$$

$$\sigma_p = \sigma^3_p = \sigma^2_p(T_{con}) \qquad \text{при}: T_{con} \le T$$

В формулах (5)-(6) $z_1, z_2 = const$; M_s, M_f – характеристические температуры прямого мартенситного преобразования; M_s^d – максимальная температура формирования механомартенсита; M_s^ϖ - максимальная температура, при которой имеет место аномальная зависимость предела формоизменений от температуры (линейное увеличение σ^i_p с ростом температуры); $M_s^d \ge M_s^\sigma \ge M_s$; T_{con}, T_{ml} – характеристические температуры материала: $T_{con} \le T_{ml}$; T_{ml} – не превышает температуры плавления материала; S_p, S_0 – характеристические напряжения начала и завершения прямого механомартенситного преобразования при однократном нагружении [5] ($S_p = (T - M_s)/K$; $S_0 = (T - M_s + \Phi_{\max}(M_s - M_f))/K$); Φ – количество мартенсита в данном мезообьеме; $\Phi_{\max}$ – максимальный размер кристаллов мартенсита [3]; $H(x)$ – функция Хевисайда.

Напряжение начала формоизменения для материала в мартенситном состоянии задается в виде:

$$\sigma_p = \sigma^i_p(T) + \sqrt{2/3}z_2 \frac{M_s^d - T}{M_s^d - M_s}(S_o - S_p). \tag{7}$$

На макроуровне компоненты вектора необратимой деформации дефектной природы определяются по формуле:

$$\varepsilon^p_k = \iiint\limits_{\Omega_1} d\Omega_1 \int\limits_t M_k (d\varphi/ds)ds; \qquad \Omega_1 = \Omega_1(\alpha, \beta, \lambda). \tag{8}$$

Интенсивность необратимой деформации определяем согласно (1); в дальнейшем рассматриваются условия, при которых $\Psi^0 = 0$ [7].

Модель применялась для описания циклических термомеханических испытаний в режиме: нагружение по программе $S = S_h + B(t - t_j)$ до величины $S_{\max}$, разгрузка до исходного значения $S = S_h$, далее нагрев до температуры $T = T_{\max}$ и охлаждение до начального уровня $T = T_h$. ($t_j \le t \le t_{j+1}$ – продолжительность упомянутых этапов роста приложенного нагружения и изменения температуры).

При описании обратимой мартенситной деформации используется модифицированное уравнение Клаузиуса-Клапейрона, которое, по аналогии с [3,5,6], может быть представлено в виде:

$$\frac{dT^*}{dt} = \frac{dT}{dt} - \frac{T_0}{q_0} D_{13} \frac{d}{dt}\left[(S,M) + c_4 R_M + c_5 I_M - c_6 f_M\right], \quad (9)$$

где $c_4, c_5, c_6 = const$.

Для описания кинетики мартенситного преобразования и определения обратимой мартенситной деформации на нижнем и верхнем структурных уровнях модели используем соответствующие соотношения [5,6]. При циклических испытаниях характеристическое напряжение начала прямого превращения определяется по формуле

$$S_{pk} = \frac{T_h - M_s - K(c_4 r_2 l \Delta S - c_6 r_3 l \Delta T)}{K(1 + c_4 r_2)} \quad (10)$$

Снятие деформации на стадии нагрева задается соотношением

$$\Delta\varepsilon_k^f = \frac{n_k^0 D_{13}}{2\Pi^2 (A_f - A_s)} \int_{T_{p1}}^{T} ((x_2)^2 b_p(x_2) - a_p(x_2)) ds, \quad (11)$$

где $x_2 = (T_h + A_f - M_s - T) / K(\Delta S + c_6 r_3 S_h (T - T_h))$; $a_p(x) = (1 - x^2)^{1/2}$; $b_p(x) = \ln\left|(1 + (1 - x^2)^{1/2}) / x\right|$.

Таким образом, в терминах предлагаемой модели каждый из рассмотренных деформационных процессов отображается перемещением соответствующих плоскостей пятимерного пространства девиаторов Ильюшина. Упомянутые деформационные явления косвенным образом связаны между собой.

Предлагаемая модель ранее была использована для описания нелинейной деформации материала с ЭПФ на основе железа (сплав Fe–9%Cr–5%Ni–14%Mn–6%Si), который подвергался испытаниям в соответствии с программой, описанной ранее, с полной разгрузкой в цикле ($S_h = 0$) [5,6]. Учет в определяющих соотношениях модели неориентированных микронапряжений термической природы позволяет описать деформационное поведение материалов с ЭПФ при циклических термосиловых испытаниях с неполной разгрузкой ($S_h \geq 0$). При этом наблюдается качественное и количественное соответствие результатов расчетов данным эксперимента [8]: прямая зависимость необратимой деформации и обратная зависимость мартенситной деформации от уровня остаточного нагружения S_h; увеличение прироста мартенситной деформации и уменьшение прироста необратимой деформации в цикле по мере возрастания числа циклов при различных уровнях остаточного нагружения.

Таким образом, предложенная модель допускает эффективное отображение взаимовлияния различных деформационных процессов при циклических термосиловых испытаниях. При этом учитываются особенности возникновения и развития различных групп остаточных микронапряжений (ориентированных и неориентированных), описывается аномальное поведение предела необратимых формоизменений в температурном диапазоне реализации прямого мартенситного преобразования.

Список литературы

1. Bo Z., Lagoudas D. Thermomechanical modelling of polycristalline SMAs under cyclic loading // Int. J. of Engineering Science, 1998, Vol.36.
2. Batdorf S., Budiansky B., Mathematical theory of plasticity, based at the slip conception // Mechanics: Collected translations, 1962, N 1, p. 135 - 155.

3. Лихачев В.А., Малинин В.Г. Структурно-аналитическая концепция прочности. СПб:Наука, 1993. 471 с.

4. Ильюшин А. Теория пластичности, Москва, 1963, 295 с.

5. Голиборода И.М. Описание взаимовлияния деформационных процессов разной природы в терминах синтезной модели // Проблемы Прочности. 1998. N 6. С. 124 - 131.

6. Goliboroga (Holyboroda) I., Rusinko K., Tanaka K. Description of an Fe-based shape memory alloy thermomechanical behaviour in terms of the synthetic model // Computational Materials Science, Vol. 13. 1999. P.218-226.

7. Голиборода И.М. // Сборник Львовского политехнического института N 210 (1987), Львов, С.33-34.

8. Tanaka K., Hayashi T., Nishimura F. and Tobushi *H.* Hysteretic behaviour in an Fe-Cr-Ni-Mn-Si polycrystalline shape memory alloy during thermomechanical cyclic loading, J. of Mater. Engineering and Perform. 3, 1995, N 2, p.p.135-143.