

УДК 539.373

ОПИСАНИЕ НЕОБРАТИМОЙ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В ТЕРМИНАХ ДВУХУРОВНЕВОЙ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

И. М. Голиборода, И. В. Кузьо, К. Н. Русинко

Национальный университет “Львівська Політехніка”, 79013 Львов, Украина

E-mail: iholybor@polynet.lviv.ua

Рассматривается обобщение двухуровневой феноменологической модели нелинейной деформации поликристаллов для описания и прогнозирования необратимой деформации современных материалов с памятью формы. Учитывается влияние различных групп остаточных микронапряжений на деформационный процесс. Продемонстрирована применимость модели для эффективного описания и прогнозирования деформационного поведения материалов с эффектом памяти формы при циклических термомеханических испытаниях.

Ключевые слова: мартенситное преобразование, эффект памяти формы, нелинейная деформация, феноменологическая модель.

Современные поликристаллические материалы в сложных условиях их применения обычно демонстрируют специфические свойства, связанные с необратимой деформацией дефектной природы: аномальное поведение предела пластичности; эффекты, связанные со скоростью деформирования; аномальную ползучесть и т. п. Наблюдается также проявление деформационных процессов мартенситной природы — обратимых мартенситных преобразований (МП), имеет место многоаспектное взаимовлияние различных деформационных процессов. Все это делает классические теории нелинейной деформации поликристаллов во многих случаях непригодными. Поэтому разработка обобщающих теорий для эффективного математического описания деформационных процессов в современных материалах чрезвычайно актуальна.

Среди различных подходов к решению упомянутой проблемы необходимо отметить концепцию скольжения [1], основанную на физически обоснованном предположении о сдвиговом характере деформации, проходящей на микроуровне. Это предположение имеет универсальный характер, поэтому модель может быть использована для описания деформационных процессов различной природы. К теориям, в которых развивается и обобщается данное направление, принадлежит двухуровневая теория пластичности [2], которая объединяет основные положения теории скольжения и концепции течения с сингулярной поверхностью нагружения. Определяющие соотношения данной модели более просты, нежели в теории скольжения, и могут быть обобщены для описания деформационных явлений. Основные составляющие деформационного процесса, который может иметь место в современных материалах с эффектом памяти формы (ЭПФ), в целом были исследованы ранее [3–7]. К ним относятся: обратимая деформация мартенситной природы, необратимая пластическая деформация дефектного происхождения, упругая деформация и деформация теплового расширения. Настоящая работа посвящена отдельному, более детальному описанию наиболее сложной составляющей деформационного процесса для материалов с ЭПФ — необратимой деформации дефектной природы. При этом учитывается взаимовлияние деформационных процессов различного происхождения, в том числе действие остаточных микронапряжений.

В предложенной модели величина деформации полагается зависящей от перемещения плоскостей в пятимерном пространстве девиаторов Ильюшина; каждой указанной плоскости отвечает определенная система скольжения. Как и в концепции Б. Будянского [1], полагаем, что данная система скольжения является единственно возможной системой 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.

Масштаб нижнего уровня зависит от физической сути исследуемых явлений. В теориях данного класса этот размер не фиксируется [8]; выделенный объем рассматривается как представительный элементарный объем, по которому проводится усреднение. Представительный характер выделенного объема предусматривает, что его характеристики сами по себе являются результатом определенного усреднения по отдельным элементам меньшего масштаба, поэтому для характеристики данного объема можно применять термин “мезообъем”.

Плоскости девиаторного пространства перемещаются поступательно, величина перемещения характеризует элементарный акт деформации. В рассматриваемом совмещенном пространстве напряжений и деформаций компоненты векторов макронапряжений и макродеформаций известным образом определяются через компоненты соответствующих девиаторов [9]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= (\sqrt{3}/2)e_{xx}, & \varepsilon_2 &= (\sqrt{2}/2)(e_{yy} - e_{zz}), & \varepsilon_3 &= \sqrt{2}e_{xy}, & \varepsilon_4 &= \sqrt{2}e_{yz}, & \varepsilon_5 &= \sqrt{2}e_{xz}, \\ S_1 &= (\sqrt{3}/2)S_{xx}, & S_2 &= (\sqrt{2}/2)(S_{yy} - S_{zz}), & S_3 &= \sqrt{2}S_{xy}, & S_4 &= \sqrt{2}S_{yz}, & S_5 &= \sqrt{2}S_{xz}.\end{aligned}$$

Если нагружение проводится в трехмерном подпространстве упомянутого пространства девиаторов, определяемого компонентами вектора S_1, S_2, S_3 , то деформация однозначно определяется по перемещению следов указанных плоскостей в трехмерном подпространстве; связь между плоскостью пятимерного пространства (с нормалью \mathbf{M}) и ее следом в трехмерном подпространстве (с нормалью \mathbf{n}) определяется соотношением $M_k = n_k \cos \lambda$, $k = 1, 2, 3$, где λ — угол между нормальями \mathbf{M}, \mathbf{n} .

Направляющие косинусы нормали к плоскости трехмерного подпространства задаются в специальной сферической системе координат, связанной с помощью углов α, β с вектором нагружения \mathbf{S} : угол β — угол между \mathbf{S} и \mathbf{n} ; α — угол между проекцией \mathbf{n} на плоскость W , нормальную к \mathbf{S} и пересекающую начало координат, и L — линией пересечения W с координатной плоскостью S_1OS_2 (рис. 1). Предложенная система координат и связанный с ней способ усреднения фактически реализуют совмещение вектора нагружения с координатной осью и таким образом обеспечивают представление компонент вектора деформации в конечном виде при произвольном пропорциональном нагружении [2–5].

При описании необратимой деформации дефектного происхождения на нижнем структурном уровне модели в переменном температурно-силовом поле может быть применена формула [10, 11]

$$d\Psi = d\varphi - K_0(T, S)\Psi dt, \quad (1)$$

где φ — интенсивность необратимой деформации; Ψ — интенсивность упрочнения или интенсивность дефектов — величина, являющаяся усредненной непрерывной характеристикой уровня развития дефектов кристаллической структуры в процессе деформирования. Интенсивность необратимой деформации является усредненной непрерывной характеристикой дисторсии кристаллической решетки в процессе деформирования. В данной модели

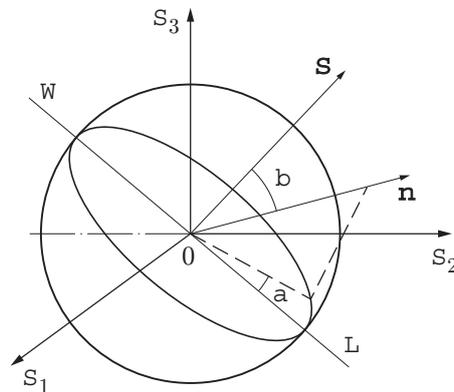


Рис. 1

она определяется смещением плоскостей относительно начального положения под действием вектора нагружения и задается в мезообъеме, который определяется нормалью \mathbf{M} . Параметр K_0 зависит от уровня температуры и абсолютной величины вектора нагружения, он характеризует интенсивность микроструктурных процессов, проходящих во времени, и в первую очередь — ползучести, и может характеризовать уровень концентрации вакансий при заданном нагружении и температуре [11]. Из уравнения (1) следует, что необратимая деформация стимулирует появление неоднородностей строения поликристалла, этот процесс сопровождается релаксацией дефектов. Данное предположение, в частности, отвечает гипотезе Бейля — Орована [12]. Соотношением (1) могут быть описаны “мгновенная” пластическая деформация и ползучесть.

При прохождении необратимой деформации дислокационного происхождения имеет место упрочнение материала, которое определяется изменением расстояния соответствующей плоскости (с нормалью \mathbf{M}) от начала координат и зависит от начальной способности материала к деформации (начальной прочности) и упрочнения, которое определяется скоростью изменения приложенного нагружения. Поэтому имеет место зависимость

$$H_M = F(R, \Psi, R_M, I_M), \quad (2)$$

где H_M — результирующее расстояние до плоскости с нормалью \mathbf{M} . При прохождении необратимой деформации выполняется равенство $H_M = (\mathbf{S}, \mathbf{M})$. Аргумент R — исходное (к началу процесса необратимой деформации) расстояние от начала координат до поверхности нагружения (ПН). В соответствии с [2] $R = \sqrt{2/3} \sigma_p$, где $\sigma_p(T)$ — напряжение, при котором начинаются необратимые формоизменения (при растяжении), зависящие от температуры [7]. В данной работе мы различаем два понятия — предел пластичности и предел необратимых формоизменений. Под первым понимается напряжение начала формоизменений при достаточно интенсивном нагружении с учетом скоростных эффектов и предшествующих циклических испытаний.

Следующие два аргумента в формуле (2) определяют перемещения плоскости с нормалью \mathbf{M} , соответствующие деформационному упрочнению. Второй аргумент (Ψ) отвечает упрочнению, которое зависит от уровня приложенной температуры и может сниматься при знакопеременном нагружении, третий аргумент (R_M), который не уменьшается, характеризует уровень повреждаемости материала [13]. Четвертый аргумент (I_M) задает дополнительные перемещения, которые со временем могут уменьшаться (релаксировать). Они отвечают скоростному упрочнению. Введение третьего и четвертого аргументов — релаксирующего и нерелаксирующего параметров — в формулу (2) отвечает действию остаточных, так называемых ориентированных микронапряжений в плоскости с нормалью \mathbf{M} . Данные напряжения на нижнем структурном уровне модели могут породиться

разными физическими факторами, связанными с неоднородностью структуры материала [8]. В частности, в материалах с ЭПФ они возникают вследствие неполного совмещения кристаллических решеток сопредельных фаз при механомартенситном преобразовании [14]. Учет напряжений, способных к релаксации, позволяет отобразить скоростные эффекты (в частности, неустановившуюся ползучесть). Упомянутые величины могут быть определены из соотношений:

$$\begin{aligned} dI_M &= r_1 d[(\mathbf{S}, \mathbf{M})] - h(T)I_M dt, & I_m &\equiv |I_M|, \\ dR_M &= \begin{cases} r_2 d[(\mathbf{S}, \mathbf{M})], & |dR_M| \geq 0, \\ 0, & |dR_M| < 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где $r_1, r_2 = \text{const}$.

Исходя из вышеизложенного интенсивность дефектов может быть задана в виде

$$\Psi = a[(H_M/\sqrt{2/3}\sigma_p(T))^2 - 1 - c_1 I_M - c_2 R_M], \quad (4)$$

где $a, c_1, c_2 = \text{const}$.

Необратимая деформация начинается с перемещением плоскостей, касательных к поверхности нагружения. Последняя первоначально представляет собой сферу радиуса $\sqrt{2/3}\sigma_p$. При дальнейшем нагружении ПН представляет собой конус, наложенный на сферическую поверхность радиуса $\sqrt{2/3}\sigma_p$:

$$H_M = \begin{cases} \sqrt{2/3}\sigma_p(T), & \beta_1 \leq \beta \leq \pi/2, \\ S \cos \beta \cos \lambda, & 0 \leq \beta \leq \beta_1. \end{cases}$$

Вершина конуса совпадает с концом вектора \mathbf{S} , основание конуса (линия его пересечения со сферой) определяется координатным углом β_1 , $0 \leq \beta_1 \leq \pi/2$; $\cos \beta_1 = \sqrt{2/3}\sigma_p/S$; $0 \leq \lambda \leq \lambda_1$; $\cos \lambda_1 = \cos \beta_1 / \cos \beta$. Противоположная (задняя) сторона ПН при нагружении также трансформируется согласно предположению:

$$\Psi_{-M} = -g\Psi_M; \quad I_{-M} = -gI_M; \quad R_{-M} = -gR_M; \quad g \leq 1.$$

Параметр σ_p можно представить в виде

$$\sigma_p = \begin{cases} \sigma_{p1} = z_1 S_p, & M_s \leq T \leq M_s^\sigma, \\ \sigma_{p2} = z_1 K^{-1} \frac{M_s^\sigma - M_s}{T_{ml} - M_s^\sigma} (T_{ml} - T), & M_s^\sigma \leq T \leq T_{con}, \\ \sigma_{p3} = \sigma_{p2}(T_{con}), & T_{con} \leq T. \end{cases} \quad (5)$$

В формуле (5) $z_1 = \text{const}$; M_s — характеристическая температура начала прямого МП [8]; M_s^σ — максимальная температура, при которой имеет место аномальная зависимость предела формоизменений от температуры (линейное увеличение σ_p^i с ростом температуры); $M_s^\sigma \geq M_s$; T_{con} , T_{ml} — температурные параметры материала; $T_{con} \leq T_{ml}$; T_{ml} не превышает температуры плавления материала; S_p — характеристическое напряжение начала прямого механомартенситного преобразования при однократном нагружении [4–5]; $S_p = (T - M_s)/K$. На рис. 2, а представлена экспериментальная зависимость σ от T (данные эксперимента [14]), на рис. 2, б — качественная зависимость σ от T , соответствующая формуле (5).

На макроуровне компоненты вектора необратимой деформации дефектной природы определяются по формуле

$$\varepsilon_k^p = \iiint_{\Omega_1} d\Omega_1 \int_t M_k \left(\frac{d\varphi}{ds} \right) ds; \quad \Omega_1 = \Omega_1(\alpha, \beta, \lambda).$$

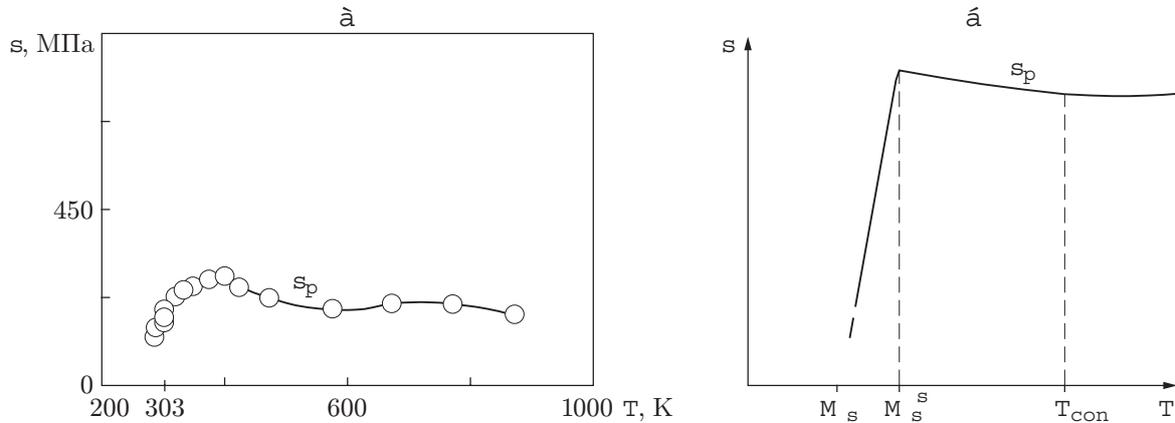


Рис. 2

При определении компонент вектора необратимой деформации границы области, где проходит деформация, находим из условия $\Psi = 0$.

Для режимов с высокой скоростью нагружения можно полагать, что уравнение (4) справедливо лишь при увеличении интенсивности необратимой деформации, в то время как соотношение (1) выполняется на протяжении всего процесса изменения интенсивности дефектов (в том числе и тогда, когда приращения необратимой деформации нет). В общем случае (при произвольных скоростях изменения нагружения) полагаем, что уравнение (1) справедливо на протяжении всего процесса испытаний. То есть изменение интенсивности дефектов (в том числе релаксация) во всех случаях описывается соотношением (1).

Таким образом, в предложенной модели рассмотренный деформационный процесс описывается перемещением соответствующего множества плоскостей пятимерного пространства девиаторов Ильюшина.

В данной постановке, как и ранее [3–7], определяющие соотношения модели могут быть приведены к виду, аналогичному деформационной теории пластичности. Строится универсальная зависимость между интенсивностью сдвижных деформаций и интенсивностью касательных напряжений.

Рассмотрим стандартные циклические испытания в режиме [14]: нагружение по программе $S = S_h + B(t - t_j)$ до величины S_{\max} (первый этап цикла); выдержка (обычно непродолжительная) при максимальном нагружении (второй этап); разгрузка до исходной величины $S = S_h$ (третий этап); нагрев до температуры $T = T_{\max}$ и охлаждение до начального уровня $T = T_v$ (четвертый этап). Здесь и далее t_j — моменты начала и завершения изменения приложенного нагружения и температуры.

В соответствии с (3) микронапряжения могут быть представлены в виде $R_M = R_M^* \cos \beta \cos \lambda$; $I_M = I_M^* \cos \beta \cos \lambda$. При этом для произвольного l -го цикла ($l = 0, 1, 2, \dots$) указанные величины на этапе нагружения ($j = 4l + 1$) при $B_1 = Br_1/h(T)$ имеют вид

$$R_M^* = r_2(S + l\Delta S); \quad I_M^* = B_1[1 - \exp[-h(T)(t - t_j)]]E_j,$$

где

$$\Delta S = S_{\max} - S_h;$$

$$E_j = (-1)^{H_T[4(l+1)]} \left[\sum_{i=1}^{j-1} (-1)^{[i/2+1]} \exp[-h(T)(t_j - t_i)] + (-1)^{[j/2+1]} \right]; \quad E_1 = 1;$$

$h(T) = \text{const}$; $H_T(x = a)$ — точечная функция Хевисайда.

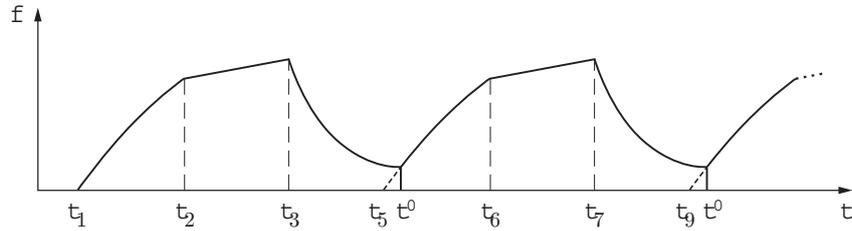


Рис. 3

При сделанных предположениях интенсивность дефектов, интенсивность необратимой деформации и компоненты вектора необратимой деформации, прирост которой имеет место в цикле на этапе нагружения, определяются в виде

$$\varphi = \Psi = a[\eta_1^{(j)} \cos^2 \beta \cos^2 \lambda - 1 - \eta_2^{(j)} \cos \beta \cos \lambda],$$

$$\varepsilon_k^p = \pi a n_k^0 \{ \eta_1^{(j)} [a_p(x_1) c_p(x_1) - 3(x_1)^4 b_p(x_1)/2] / 3 - [a_p(x_1) - (x_1)^2 b_p(x_1)] - \eta_2^{(j)} [(x_1^2 + 1/2) \arccos x_1 - 3x_1 a_p(x_1)/2] \}, \quad (6)$$

где $a_p(x) = \sqrt{1-x^2}$; $b_p(x) = \ln |(1 + \sqrt{1-x^2})/x|$; $c_p(x) = 1 + x^2/2$; $\eta_1^{(j)} = 3S^2/(2R^2)$; $\eta_2^{(j)} = c_1 I_M^* + c_2 R_M^*$; $R = \sigma_p(T_v)$; x_1 — корень квадратного уравнения $\eta_1^{(j)} x_1^2 - \eta_2^{(j)} x_1 - 1 = 0$.

На втором этапе цикла (выдержка при $S = S_{\max}$) интенсивность дефектов, интенсивность необратимой деформации и необратимая деформация на макроуровне определяются аналогично [7]. На третьем этапе (разгрузка; полагаем $S_h = 0$) и на четвертом этапе (изменения температуры) приращения необратимой деформации нет, происходит релаксация дефектов. Разрешив (1), получим формулу, описывающую интенсивность дефектов в период их релаксации (обозначим ее как Ψ^*):

$$\Psi^* = \Psi(t \geq t_{4l+3}) = [\eta_1^{(2)} \cos^2 \beta \cos^2 \lambda - \eta_2^{(2)} \cos \beta \cos \lambda - 1] e^{-K_0(t-t_{4l+3})}. \quad (7)$$

При этом область релаксации дефектов не изменяется с течением времени и отвечает области, где $\Psi \geq 0$ (т. е. имеет место деформационное упрочнение) во время выдержки при максимальном нагружении. Сама же величина Ψ со временем релаксирует согласно (7). Пусть теперь при $t = t_{j+1}$ начинается следующий цикл. Интенсивность дефектов может возрастать, при этом (при неполной релаксации Ψ^*) она увеличивается не от нуля, а от некоторой неотрицательной величины, до которой она релаксировала в предыдущем цикле. Диаграмма изменения интенсивности дефектов приведена на рис. 3. В дальнейшем через Ψ_a будем обозначать интенсивность дефектов, которая определяется согласно (4). Тогда момент возобновления необратимой деформации t' определим численно из соотношения $\Psi_a(t', \beta = 0, \lambda = 0) = \Psi^*(t', \beta = 0, \lambda = 0) = 0$. При $t \geq t'$ интенсивность дефектов описывается соотношением (4), область реализации необратимой деформации определяется соотношением $\Psi_a(t \geq t') - \Psi^*(t') = 0$.

Как и ранее, необратимая деформация определяется согласно (6) при соответствующих значениях $\eta_1^{(j)}$, $\eta_2^{(j)}$, $\eta_3^{(j)}$. Аналогичным образом определяется необратимая деформация для произвольного цикла испытаний.

В целях подтверждения достоверности модели проводились расчеты для образцов, изготовленных из сплава Fe9%Cr5%Ni14%Mn6%Si, которые находились под действием циклического температурного и силового воздействия (растяжение) по упомянутой схеме. Изменение нагружения происходит с достаточно высокой скоростью, разгрузка в цикле — полная ($S_h = 0$); $T_{\max} = 873$ К, продолжительность выдержки при $S = S_{\max}$ равна нулю.

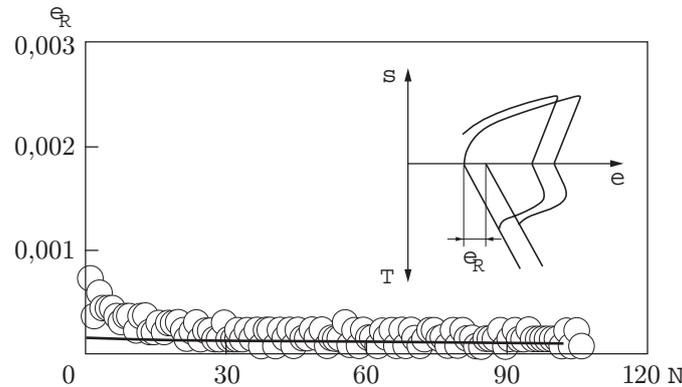


Рис. 4

Сравнение проводилось с данными экспериментов [14]. Компоненты необратимой деформации дефектного происхождения определялись согласно приведенным выше соотношениям. Другие составляющие деформационного процесса — компоненты обратимой мартенситной деформации, упругой деформации и деформации теплового расширения — при необходимости определялись в соответствии с [6, 7].

На рис. 4 представлена зависимость необратимой деформации дислокационной природы ε_R от числа циклов N (кружки — экспериментальные данные [14], сплошная линия — результаты расчетов). На вставке в верхней части рисунка приведена схематическая диаграмма изменения суммарной нелинейной деформации в цикле, в том числе снятие обратимой мартенситной деформации вследствие нагрева и выделение остаточной деформации ε_R . Максимальная нагрузка в цикле $\sigma_{\max} = 350$ МПа; температура выдержки $T_v = 303$ К, $T_{\max} = 873$ К. Имеет место количественное и качественное соответствие теоретических расчетов данным эксперимента — наблюдается постепенное уменьшение приращения необратимой деформации в цикле.

На рис. 5 показана зависимость σ от ε при двукратном термомеханическом испытании согласно описанной выше программе с максимальной нагрузкой $\sigma_{\max} = 290$ МПа (первый цикл) и 350 МПа (второй цикл) и температурой выдержки $T_v = 430$ К. На рисунке σ — приложенная нагрузка в цикле, ε — суммарная деформация; штриховые кривые соответствуют экспериментальным данным [14], сплошные — результатам расчета. Как следует из эксперимента, при повышенных температурах выдержки основной вклад в деформационный процесс вносит необратимая деформация, имеющая дефектное происхождение. Мартенситная деформация при такой температуре выдержки практически не проявляется. Таким образом, теория позволяет адекватно описывать деформационное поведение образца. Константы модели были выбраны следующими: $K = 0,4842105$ К/МПа; $a = 4,1 \cdot 10^{-5}$; $T_{con} = 340$ К; $M_s^c = 340$ К; $z_1 = 1$; $c_1 = 0$; $c_2 = 1,9$; $r_2 = 0,05$ МПа $^{-1}$.

Выводы. Среди разнообразных приборов и механизмов с МП можно выделить широкий класс так называемых термомеханических устройств (ТМУ), где механическая работа совершается без преобразующих устройств (электродвигатели, парогенераторы и т. д.) при преобразовании тепла в работу, что является одним из существенных преимуществ [15]. При этом к материалу устройства могут быть предъявлены следующие требования: высокий уровень развиваемых термомеханических напряжений; высокий уровень обратимой деформации и минимальный уровень необратимой деформации, которые наводятся в ходе МП; циклическая стойкость к снижениям термомеханических характеристик; умеренная стоимость; возможность проявления двустороннего эффекта памяти формы. Материалы с ЭПФ на основе железа наиболее полно отвечают указанным тре-

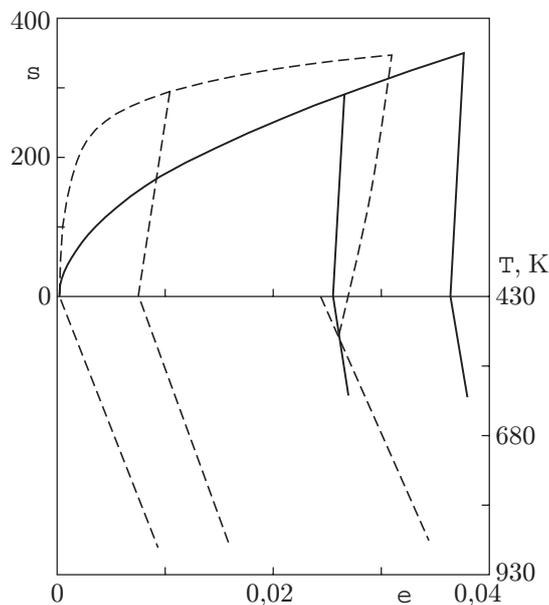


Рис. 5

бованиям и, таким образом, представляют собой чрезвычайно важную и перспективную группу материалов с новыми свойствами. По своим характеристикам они могут быть успешно использованы для создания разнообразных ТМУ.

Предложенная модель позволяет описать необратимую деформацию дислокационной природы поликристалла в условиях обратимого мартенситного преобразования при сложных термомеханических режимах испытаний. При этом отображаются основные закономерности деформационных процессов различной природы, совместное проявление различных групп остаточных напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батдорф С. Б., Будянский Б. В. Математическая теория пластичности, основанная на концепции скольжения: Сб. пер. // Механика. 1962. № 1. С. 135–155.
2. Русинко К. Н., Андрусик Я. Ф. Пластическое деформирование упрочняющихся материалов при нагружении в трехмерном подпространстве пятимерного пространства девиаторов пластичности // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1993. № 2. С. 92–101.
3. Голиборода И. М., Русинко К. Н. Описание обратимой деформации, вызванной мартенситными преобразованиями, в рамках синтезной модели // Пробл. прочности. 1995. № 8. С. 68–75.
4. Голиборода И. М., Русинко К. Н. Установление универсальной зависимости между интенсивностями касательных напряжений и деформаций сдвига при описании обратимой мартенситной деформации в рамках синтезной модели // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 3. С. 178–185.
5. Голиборода И. М., Русинко К. Н. Феноменологическая модель нелинейной деформации поликристаллических материалов, порожденной мартенситными преобразованиями // Журн. техн. физики. 1996. № 11. С. 124–135.
6. Голиборода И. М. Описание взаимовлияния деформационных процессов дефектной и мартенситной природы в терминах синтезной модели // Пробл. прочности. 1998. № 6. С. 124–131.

7. **Голиборода И. М.** Описание необратимой деформации, упругой деформации и деформации теплового расширения поликристалла в условиях обратимого мартенситного преобразования // Математические методы и физико-механические поля. 2001. Т. 44, № 1. С. 114–123.
8. **Лихачев В. А., Малинин В. Г.** Структурно-аналитическая теория прочности. СПб.: Наука. С.-Петербург. отд-ние, 1993.
9. **Ильюшин А. А.** Теория пластичности. М.: Наука, 1963.
10. **Голиборода И. М.** Влияние температурных эффектов на деформацию ползучести // Вестн. Львов. политехн. ин-та. Сер. Динамич. прочность машин и приборов. Львов, 1987. № 210. С. 33, 34.
11. **Русинко К. Н., Голиборода И. М.** Влияние температурного упрочнения и последействия на ползучесть металлов с кубической пространственной решеткой // Пробл. прочности. 1988. № 11. С. 58–62.
12. **Orowan E.** The creep of metals // J. West Scotland Iron Steel. Inst. 1946. V. 54. P. 45–59.
13. **Работнов Ю. Н.** Прочность материалов. М.: Наука, 1962.
14. **Tanaka K., Hayashi T., Nishimura F., Tobushi H.** Hysteretic behavior in an Fe–Cr–Ni–Mn–Si polycrystalline shape memory alloy during thermomechanical cyclic loading // J. Mater. Engng and Perform. 1995. V. 3, N 2. P. 135–143.
15. **Чернов Д. Б.** Перспективы создания термомеханических устройств // Современные вопросы физики и механики материалов: Материалы XXXII семинара “Актуальные проблемы прочности”, Санкт-Петербург, 12–14 нояб. 1996 г. СПб.: Б. и., 1997. С. 97–105.

Поступила в редакцию 23/VII 2003 г.
