

Диссипативные процессы при неравновесных фазовых превращениях в мартенситных термоупругих сплавах

© Т.А. Шахназаров,¹ И.К. Камилов,¹ А.Б. Синани,² Т.С. Лугуев¹

¹ Институт физики Дагестанского научного центра РАН,
367003 Махачкала, Россия
e-mail: timur.luguev@mail.ru

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: alfred@mdlab.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 27 апреля 2009 г. В окончательной редакции 19 января 2010 г.)

Рассмотрены мартенситные термоупругие превращения в неравновесных условиях, когда система монотонно стремится к стационарному процессу. Экспериментально исследованы особенности процесса фазового превращения в рассматриваемых неравновесных условиях на молекулярных моделях. Установлен резонансный режим фазового превращения, позволяющий на порядок ускорить процесс без увеличения температуры источника тепла. Оценены диссипативные процессы при монотонном и резонансном режимах мартенситных термоупругих превращений. Показано, что резонансный режим протекает с отрицательным производством энтропии и является проявлением самоорганизации системы. Полученные результаты создают основу для разработки материалов и процессов переработки низкопотенциальных источников тепла.

Введение

Мартенситные термоупругие превращения в сплавах могут происходить в достаточно узком температурном интервале (30–50°C), что имеет важное значение для переработки низкопотенциальных (бросовых) источников тепла. При реализации превращения в интерметаллиде TiNi и сплавах на его основе процесс фазового перехода характеризуется эффектом пластичности превращения с большой неупругой деформацией (более 8%) и тепловыделением более 8.3 kJ/mol [1]. Однако в реальных мартенситных двигателях для достижения надлежащей скорости превращения необходимо создавать определенное переохлаждение ниже температуры начала прямой мартенситной реакции и достаточный перегрев выше температуры окончания обратного перехода. В результате реальный температурный интервал составляет 200–250°C [2]. Обеспечить высокую скорость фазового превращения без заметного увеличения исходного градиента температуры можно при создании условий для реализации нелинейной зависимости скорости превращения от движущей силы. В условиях умеренной средней скорости превращения это может быть достигнуто созданием периодических колебаний скорости фазового перехода [3]. Наблюдаемое в работе [3] самопроизвольное колебательное изменение скорости движения фазовой границы после случайных внешних воздействий подчиняется, как показано в [4], закону простого гармонического маятника. Таким образом, в рассматриваемом случае имеет место плавное синусоидальное изменение скорости фазового превращения из-за особенностей термоупругого взаимодействия.

Стремление использовать такой нелинейный режим фазового превращения для ускорения процесса потребовало изучения возможности и условий проявления резо-

нанса при рассматриваемом колебательном изменении скорости превращения. Результаты экспериментального исследования нелинейного колебательного процесса фазового превращения на модельных монокристаллах методом молекулярной динамики показали возможность осуществления резонансного режима с обеспечением увеличения скорости превращения на порядок при неизменном температурном потенциале источника тепла [5].

Термоупругое взаимодействие при эффективном тепловыделении и большой величине деформации заметно проявляется и в повышении уровня демпфирования сплавов. Исследование внутреннего трения в работе [6] проведено на основе оценки диссипативных свойств материалов в условиях проявления мартенситного термоупругого превращения. При этом установлено, что на уровень необратимых потерь при фазовом превращении заметно влияет скорость процесса, зависящая как от градиента температуры, так и от механического напряжения. Не менее важным фактором, как отмечено в [6], определяющим подвижность межфазных границ, является их взаимодействие со структурными дефектами (точечные дефекты, границы зерен). Но при использовании результатов работы [6] необходимо иметь в виду, что схема перестройки структуры при исследовании внутреннего трения базируется на условии, что границы раздела фаз движутся в поле дальнедействующих напряжений, а гистерезисные явления связаны только с необратимыми процессами спонтанного роста кристаллов новой фазы от перевального состояния до положения устойчивого равновесия, что обеспечивается приложенным к кристаллу внешним периодическим полем напряжений.

Рассматриваемый нами процесс мартенситного термоупругого превращения направлен на оптимизацию превращения тепловой энергии в механическую работу.

Поэтому в работах [3–5] исследуется термоупругое взаимодействие при строгом соответствии направления потоков и механического напряжения, для чего используются протяженные образцы с отношением длины к толщине не менее 40 : 1, и эти образцы заключены в адиабатическую оболочку для предотвращения тепловых потоков с боковых стенок. Поведение рассматриваемых систем с позиций термодинамической теории [7] объясняется как немонотонное движение их к стационарному состоянию в условиях умеренных скоростей фазового превращения, когда сродство фазовой реакции находится в области $RT \ll A \ll \infty$ и движение двухфазной системы к стационарному состоянию будет нелинейным, а его последствия — непредсказуемыми.

Таким образом, с одной стороны, учитывая результаты работы [6], исследование интенсификации фазового перехода при мартенситных термоупругих превращениях, осуществленное на монокристаллах, необходимо провести на поликристаллах с оценкой кинетических особенностей процесса. С другой стороны, учитывая, что интересующий нас процесс исследуется в неравновесных условиях при движении системы к стационарному (а не равновесному) состоянию, необходима термодинамическая оценка фазового превращения во внешнем поле при условии, что не происходит релаксации внутренних напряжений. Для этого можно использовать подход, разработанный в [8] при рассмотрении гистерезиса фазовых превращений в твердых телах.

1. Анализ особенностей термодинамического гистерезиса при фазовых превращениях в неравновесных условиях

Равновесие фазы 1 с макроскопическим кристаллом фазы 2 определяет уравнение [8]:

$$\Delta\varphi + e\{\varepsilon(\sigma)\} = 0, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ — барьер свободной энергии при фазовом превращении в равновесных условиях; $e\{\varepsilon(\sigma)\}$ — упругая энергия двухфазной системы, отнесенная к его объему. Уравнение (1) и аналогичное, описывающее равновесие кристалла фазы 1 относительно матрицы фазы 2 для обратного превращения, определяют границы запрещенной для превращения области, т. е. термодинамический гистерезис между прямым и обратным превращением в твердом теле. Необходимым условием образования новой фазы является

$$\Delta\varphi + e\{\varepsilon(\sigma)\} < 0. \quad (2)$$

Как показано в [9], при рассмотрении мартенситных превращений состояние фаз полностью определяется деформацией $\varepsilon(\sigma)$. В работах [8,9] рассматриваются системы, в которых независимыми переменными являются напряжение σ и температура T , а определяющим

термодинамическим потенциалом — свободная энергия Гиббса

$$dZ = SdT + \varepsilon d\sigma.$$

В системе, рассматриваемой в работах [3–5], независимыми переменными являются деформация ε и температура T , а определяющим термодинамическим потенциалом — свободная энергия Гельмгольца

$$dF = SdT + \sigma d\varepsilon.$$

Поэтому при мартенситных превращениях в этих системах состояние фаз полностью определяется напряжением $\sigma(\varepsilon)$.

Для этого случая зависимость (2) примет вид:

$$\Delta\varphi + e\{\sigma(\varepsilon)\} < 0. \quad (3)$$

При небольших отклонениях от нуля эти превращения имеют обратимый характер и линия равновесия фаз возвращается к равновесному положению. В неравновесных условиях, когда отклонения от нуля по зависимостям (2) и (3) приобретают необратимый характер, линия, определяющая состояние фаз, не возвращается к равновесному положению и эффективная величина $\Delta\varphi$ фиксирует реальные особенности фазового превращения. Как показано в [6], эти особенности связаны с необратимыми процессами перестройки структуры и со скоростной зависимостью движения границ раздела в направлении старой фазы. В результате эффективная величина $\Delta\varphi$ должна иметь квазистатическую и динамическую составляющие гистерезиса. А $e\{\sigma(\varepsilon)\}$ обеспечивает энергетический выигрыш при образовании термодинамически более устойчивой фазы за счет изменения поля внутренних напряжений. В неравновесных условиях проявляются различия в зависимостях от скорости эффективной величины $\Delta\varphi$ и $e\{\sigma(\varepsilon)\}$.

Скоростная зависимость термодинамического гистерезиса наиболее заметно проявляется при максимальной реализации скрытой теплоты фазового перехода (создание адиабатической оболочки). Оценки такого процесса в продольном стержне [4] показали, что временные изменения тепловой и механической составляющих движущей силы процесса взаимозависимы, нелинейны и определяют переменное сопротивление среды при фазовом превращении.

Рассмотренные определяющие особенности фазового превращения в неравновесных условиях создают трудности при его оценке в целом. Они могут быть преодолены при моделировании процесса методом молекулярной динамики с разработкой соответствующих моделей. Для разработки процесса термоупругого фазового превращения на молекулярном уровне могут быть использованы представленные в [10] модель кооперативных колебаний и анализ зарождения мартенситных структур. При этом необходимо учесть кристаллографические особенности оцениваемых превращений, детально рассмотренные в [11].

2. Исследование процесса фазового превращения в неравновесных условиях методом молекулярной динамики

Модельные эксперименты базировались на результатах реальных экспериментов, проведенных в работе [3] на кристаллах TiNiCu (mass. 9%). В качестве исходной была взята двумерная ангармоническая модель твердого тела с потенциалом взаимодействия Леннарда–Джонса, в которой использован алгоритм, реализующий процесс кристаллизации материала с формированием второй фазы [12]. В отличие от [12] в настоящей работе механизм процесса формирования второй фазы рассматривается на трехмерной решетке из-за более сложного его характера. При этом реализованы представления о замерзании кооперативных колебаний атомов одного или нескольких кристаллографических направлений, рассматриваемые как основа термоупругого мартенситного превращения [10]. Структурный переход в соответствии с [3] детализирован на превращении B2–B19, при котором замерзание колебаний объектов — плоскостей (превращение их динамических смещений в статические) — происходило по сдвиговому механизму и приводило к образованию моноклинной фазы [10]. Машинное моделирование последовательности корреляционных функций было дополнено расчетом трехчастичной функции распределения, что позволяет оценивать динамику фазового перехода в подобных случаях [13].

Расчеты межатомного взаимодействия, как и в [12], велись по алгоритму Верле в скоростной форме, но при этом шаг интегрирования был уменьшен до 10^{-12} с. Отношение длины модельного образца к толщине составляло 40 : 1, что, как и в случае реальных экспериментов, при движении фазовой границы вдоль образца исключало краевые эффекты.

Были проведены три серии экспериментов, в которых оценивались:

- 1) влияние поликристалличности материала на процессы перестройки структуры при фазовом превращении,
- 2) влияние скорости фазового превращения на особенности поведения системы в неравновесных условиях,
- 3) резонансные режимы фазового превращения.

С учетом того, что рассматриваемая нами неравновесная система должна работать при сродстве реакции фазового превращения в пределах $RT \ll A \ll \infty$, исходная скорость превращения во всех модельных экспериментах соответствовала установленной в реальных экспериментах [3] минимальной скорости, при которой появляются периодические колебания ее от случайных воздействий.

При изучении влияния размера зерна на процессы перестройки структуры при фазовом превращении были использованы четыре разновидности модельных образцов: 1 — монокристалл, 2 — поликристалл с 9 зёрнами в поперечном сечении, 3 — с 36 зёрнами, 4 — с 256 зёрнами.

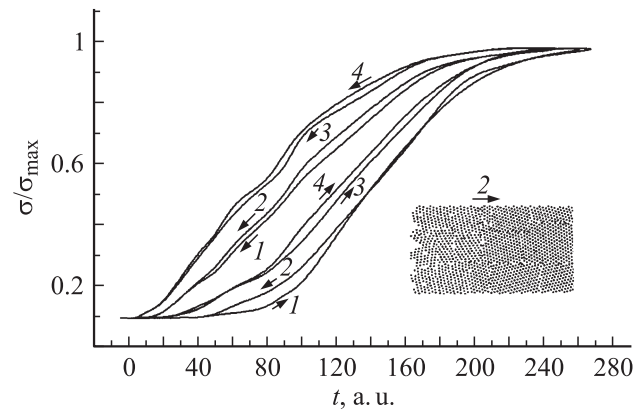


Рис. 1. Зависимости реактивного напряжения σ от продолжительности процесса t при гистерезисе фазового превращения на образцах: 1 — монокристалл, 2 — поликристалл с 9 зёрнами в поперечном сечении, 3 — с 36 зёрнами, 4 — с 256 зёрнами.

Результаты экспериментов представлены на рис. 1 в координатах „реактивное напряжение σ — продолжительность процесса t “. Исходная скорость превращения задавалась установленной скоростью подвода тепла с одного конца образца (при превращении мартенсит–аустенит) и отвода тепла с другого конца (при превращении аустенит–мартенсит). При такой организации процесса линия термодинамического гистерезиса фиксировала все квазистатические и динамические особенности фазового превращения.

Как показывают зависимости изменения реактивного напряжения в течение процесса фазового превращения на рис. 1, при появлении и увеличении поликристалличности материала не претерпевают заметных изменений как средняя ширина петли гистерезиса, так и ее форма на отдельных участках. Изменение структуры кристалла при фазовом превращении показано на поликристалле с 9 зёрнами в поперечном сечении.

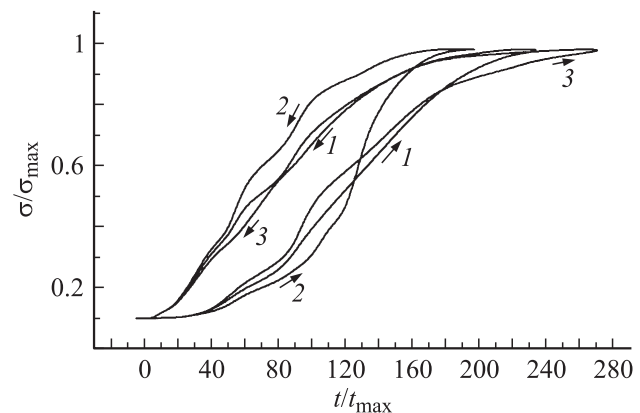


Рис. 2. Зависимости реактивного напряжения σ от продолжительности процесса t при гистерезисе фазового превращения на образце с 256 зёрнами в трех скоростных режимах: 1 — исходная скорость в соответствии с работой [3], 2 — увеличена в 10 раз, 3 — уменьшена в 7 раз от исходной.

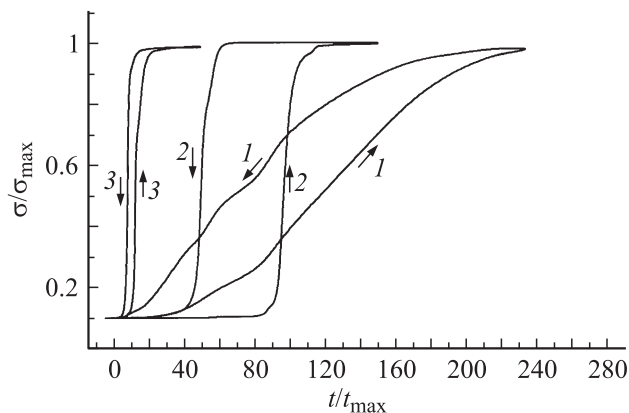


Рис. 3. Зависимости реактивного напряжения σ от продолжительности процесса t при гистерезисе фазового превращения на образце с 256 зернами в трех режимах: 1 — стационарный, 2 — резонансный, 3 — модифицированный резонансный.

Результаты влияния скорости фазового превращения на термодинамический гистерезис представлены на рис. 2. Зависимости получены на кристаллах с 256 зернами. Из рисунка видно, что при увеличении скорости превращения в 10 раз (кривые 2–2) по сравнению с исходной (кривые 1–1) значительно возрастает как общая ширина петли гистерезиса, так и ее форма на отдельных участках. При снижении скорости фазового превращения в 7 раз по сравнению с исходной наглядно проявляется обратный процесс (кривые 3–3).

И наконец, на рис. 3 представлены результаты резонансного режима фазового превращения. Склонность рассматриваемой неравновесной системы к самопроизвольному проявлению периодических колебаний скорости превращения реализована в виде резонанса этих колебаний (резкое увеличение амплитуды и снижение частоты колебаний). Кривые 1–1 отражают исходный процесс фазового превращения на поликристалле с 256 зернами в поперечном сечении. Они характеризуют стационарный режим фазового превращения, когда процесс роста мартенситной фазы обеспечивается при равенстве скоростей изменения термодинамической и механической составляющей эффективного напряжения, действующего на фазовую границу.

Отклонения от стационарного режима, приводящие (как было отмечено выше) к самопроизвольным колебаниям по закону простого гармонического маятника, были подготовлены изменением состава материала по длине образца по зависимости $y = A \sin x$ (x — координата в направлении длины образца, y — составляющая материала, влияющая на температуру фазового перехода). Такое воздействие на температуру фазового перехода проявляется в синусоидальном изменении величины колебательного параметра системы и классифицируется как параметрический резонанс.¹ Для резонансного режима (кривые 2–2) характерны следующие особенности. Во-первых, процесс прямого и

обратного перехода задерживается до соответствующего изменения в материале тепловой энергии. Во-вторых, в отличие от кривых 1–1 линии 2–2 круто поднимаются вверх, характеризуя резкое увеличение скорости фазового превращения при резонансном режиме. Общая продолжительность полного цикла превращения снижается приблизительно в два раза.

С использованием особенностей резонансного режима фазового превращения были изменены условия накачки и откачки тепловой энергии. Подвод тепла стали осуществлять не только с одного конца образца, но и с боковых его поверхностей. Отвод — с другого конца и боковых поверхностей. Результаты представлены на рисунке кривыми 3–3. Преимущества модифицированного резонансного режима очевидны. Как показывают кривые 3–3, продолжительность полного цикла снизилась приблизительно на порядок при том же температурном потенциале источника тепла.

Представленные результаты экспериментов на рис. 1–3 показывают, что термодинамический гистерезис в неравновесных условиях, подчиняющийся зависимости (3), может изменяться как в сторону увеличения, так и в сторону понижения эффективного значения $\Delta\varphi$. Несмотря на это реализация зависимости (3) обеспечивается соответствующим изменением упругой энергии системы $e\{\sigma(\varepsilon)\}$.

Такое представление фазовых превращений в неравновесных условиях позволяет проанализировать полученные результаты с единых позиций в виде следующих обобщений.

1. При движении фазовой границы в поликристалле появляющиеся препятствия в виде границ зерен незначительно повышают энергозатраты на превращение, и величина термодинамического гистерезиса заметно не изменяется (рис. 1).

2. При изменении скорости фазового превращения заметно проявляются динамические особенности, что наблюдается по общему увеличению (или уменьшению) термодинамического гистерезиса при возрастании (или понижении) скорости процесса. Но при этом сильнее проявляются неоднородности кристаллического строения, что видно по форме гистерезисных линий. Все это характеризует динамические особенности фазового превращения (рис. 2).

3. Взаимозависимость изменения эффективного значения $\Delta\varphi$ и $e\{\sigma(\varepsilon)\}$ наиболее сложную форму приобретает при резонансных режимах фазового превращения (рис. 3). Характер полученных зависимостей указывает на то, что принципиально изменяется энергетика процесса. Превращение осуществляется уже не монотонно (за счет наличия градиента температуры по ходу процесса), а самопроизвольно при достижении определенного предела тепловой энергии в материале. При этом такие препятствия, как границы зерен, практически не влияют на энергетику процесса. Полностью преобладают динамические особенности процесса. Полученные на поликристалле гистерезисные кривые (рис. 3) практически не отличаются от кривых, отражающих процесс на монокристаллах, представленных в работе [5].

¹ Физическая энциклопедия. 1992. Т. 3. С. 591–592.

Систематизация экспериментального материала с разделением на квазистатическую и динамическую составляющие приращения гистерезиса фазового перехода позволяет определенным образом оценить неравновесную систему при термоупругих мартенситных превращениях. Но более глубокий анализ необратимых процессов с использованием зависимости (3) связан с необходимостью оценки различных кинетических особенностей проявления скрытой теплоты и собственной деформации фазового превращения. Эволюция подобных сложных систем, в которых выполняется принцип локального равновесия, характеризуется, как показано в [7], диссипативными процессами. Особенности диссипации энергии в материале характеризуют динамические особенности протекающих необратимых процессов.

3. Оценка динамики неравновесных фазовых превращений в мартенситных термоупругих сплавах

Результаты проведенного экспериментального исследования дали характеристику протекающих процессов на макроуровне. Но насколько связанные с ним микропроцессы соответствуют определяющим особенностям неравновесных фазовых превращений, рассмотренным в разд. 1, и характеризуют воздействие на них динамического поведения системы, необходимо оценить посредством анализа протекания диссипативных процессов. В основу изучения диссипативных процессов положен статистический подход, который позволяет связать поведение рассматриваемой макросистемы с развитием ансамбля микросистем в фазовом пространстве. Для такого рассмотрения удобно использовать подход, выработанный в [14] при изучении термомеханических систем. В соответствии с результатами работы [14] диссипативная функция определяется соотношением:

$$D(\dot{x}_k) = \theta \frac{d^{(i)}S}{dt} \geq 0, \quad (4)$$

где θ — температура, $d^{(i)}S$ — некоторое порождение энтропии, t — время, x_k — механические координаты.

Анализ изменения диссипативной функции необходимо осуществлять на элементе сплошной среды, для чего, как и в [14], вводим крупноструктурное разделение фазового пространства. Произвольное число систем фазового пространства скомбинировано так, что между ними возможен обмен энергией. Такая совокупность систем является составной. Системы, входящие в ее состав, называются основными. Каждая из основных систем ведет себя квазистатически, поток и перенос фазовых точек в соответствующих фазовых пространствах таковы, что их распределения всегда канонические. В составной системе распределение фазовых точек представляется в расширенном фазовом пространстве, являющемся совокупностью фазовых пространств основных

систем. Но при этом распределение не обязано быть каноническим, так как основные системы остаются изолированными одна от другой. Механические координаты и температуры основных систем становятся свободными и определяются взаимодействием между основными системами.

В таком расширенном фазовом пространстве динамическую оценку поведения неравновесной системы можно провести, используя уравнение движения [15]:

$$\rho \dot{v} = \rho F + \nabla T, \quad (5)$$

где \dot{v} — ускорение элемента массы dM , ρ — плотность, F — внешняя сила, действующая на элемент массы dM , ∇T — тензорная дивергенция напряжения.

В уравнении (5) член ρF выражает действие объемных сил, которые непосредственно проявляются на каждом элементе континуума. В рассматриваемых нами случаях термоупругого взаимодействия внешняя сила (рис. 1–3) прилагается к внешней поверхности. При фазовом превращении появляющееся на межфазной поверхности механическое напряжение моментально взаимодействует с внешней силой, характеризуя процессы внутри основных систем. Дивергенция тензора напряжений ∇T , определяющая плотность источника напряжений, при фазовом превращении будет характеризоваться интенсивностью тепловыделения на фазовой границе и скоростью теплоотвода от нее, что связано со взаимодействием между основными системами. При стационарном протекании фазового превращения вдоль образца (см. рис. 1–3) суммарное изменение внешней силы от изменения механического напряжения и противоположно направленного источника напряжений от тепловыделения на фазовой границе будет монотонным. Появление колебаний скорости фазового превращения объясняется тем, что процессы взаимодействия между основными системами вначале замедляют фазовое превращение и движение составной системы к стационарному состоянию, а в завершающей стадии колебания, наоборот, ускоряют фазовое превращение и переводят его на новое колебание.

Изменение эффективной температуры фазового превращения по длине образца в синусоидальной зависимости (за счет соответствующего подбора состава материала) приводит к тому, что начальное замедление фазового превращения из-за тепловыделения на фронте кристаллизации исключается за счет соответствующего возрастания эффективной температуры фазового превращения. Если изменение эффективной температуры фазового превращения по длине образца соответствует параметру гармонического колебания, то возрастание скорости процесса идет до полного завершения его на конце образца, т.е. происходит резонансное фазовое превращение.

Резонансное фазовое превращение по непрерывности продвижения фронта кристаллизации подобно монотонному в стационарном режиме. Принципиальное отличие выявляется при термодинамической оценке процесса

в составной системе. Скорость монотонного процесса определяется скоростью продвижения теплового потока, подаваемого извне, от одной основной системы к другой с обеспечением компенсации выделяемого при фазовом превращении тепла (или поглощаемого при обратном процессе). В случае резонансного превращения вариация эффективной температуры фазового превращения по длине образца позволяет непрерывно вести процесс за счет теплосодержания материала. При этом в составной системе процессы между основными системами выполняют только диссипативную функцию. Определяющее изменение энтропии системы осуществляется за счет процессов, происходящих в основных системах с понижением их теплосодержания.

Таким образом, при стационарном режиме протекания фазового превращения скорость порождения энтропии, или диссипативная функция системы, будет возрастать в соответствии с зависимостью (4). В случае резонансного режима скорость фазового превращения будет определяться изменением эффективной температуры фазового перехода при продвижении фазовой границы вдоль образца. Такое изменение эффективной температуры изначально скорректировано под синусоидальную закономерность самопроизвольного термоупругого взаимодействия и определяет взаимосвязь между условиями продвижения фазовой границы по длине образца и скоростью фазового превращения. Рассматриваемое саморегулируемое изменение скорости фазового превращения, определяемое взаимодействием тепловых и деформационных процессов, по мере приближения к горизонтальному участку синусоиды будет характеризоваться появлением отрицательного производства энтропии.

Связать развитие ансамбля эквивалентных микросистем с поведением макросистемы позволяет сравнение произведенной работы с диссипативной функцией $D(\dot{x}_k)$, характеризующей развитие системы в фазовом пространстве [14]:

$$dW = X_k^i dx_k = D(\dot{x}_k) = \theta \frac{d^{(i)}S}{dt}, \quad (6)$$

где dW — работа, совершаемая при рассматриваемом процессе, X_k^i — макроскопические необратимые силы, x_k — механические координаты.

Производство энтропии в условиях стационарного и неравновесного режимов будет определяться изменением скорости процессов фазового превращения.

При термоупругом превращении действие макроскопических сил проявляется через эффективное напряжение (G_{eff}), действующее на фазовую границу. Оно определяется величиной внешнего термодинамического стимула ($\Delta\mu$) и полем внутренних напряжений (σ_i) [3]

$$G_{\text{eff}} = \frac{\Delta\mu}{\varepsilon_s} - \sigma_i, \quad (7)$$

где ε_s — собственная деформация превращения. Стационарный процесс фазового превращения характеризуется

стабильным значением эффективного напряжения, что обеспечивается в процессе роста мартенситной фазы равенством скоростей изменения термодинамической и механической составляющей G_{eff} :

$$\frac{\partial(\Delta\mu/\varepsilon_s)}{\partial t} = \frac{\partial\sigma_i}{\partial t}. \quad (8)$$

При случайных отклонениях от стационарного режима зависимость (8) нарушается и изменение температуры в зоне фазового превращения становится немонотонным. Возрастание или понижение температуры от стационарной величины происходит до предела, когда интенсивность изменения притока тепла от реакции фазового превращения сравнивается с интенсивностью возрастания или понижения теплоотода от зоны превращения за счет теплопроводности. Такой процесс в продольном стержне приводит к периодическим колебаниям скорости превращения и может быть осуществлен в резонансном режиме, когда скорость превращения и амплитуда колебания возрастают многократно.

Проведенный анализ объясняет закономерности проявления нелинейного процесса фазового превращения при структурной неоднородности материала, вариации скорости превращения и показывает принципиальные отличия резонансного нелинейного процесса от монотонного, стационарного. Эти отличия позволяют на порядок увеличить скорость превращения при неизменном температурном потенциале источника тепла. Появляющаяся потребность в изменении состава материала для вариации температуры фазового превращения по длине образца не представляет труда, так как разработанный авторами [16] способ получения интерметаллида TiNi и сплавов на его основе позволяет легко это осуществить.

Заключение

1. Термоупругие мартенситные превращения в неравновесных условиях, связанные с различным влиянием скорости процесса на эффективные значения тепловых и механических составляющих фазового перехода, необходимо оценивать термодинамическим гистерезисом, характеризующим реальный процесс превращения.

2. Влияние скорости фазового превращения в области, когда сродство A оценивается пределами $RT \ll A \ll \infty$, проявляется на статической и динамической составляющих термодинамического гистерезиса.

3. Результаты модельных экспериментов подтверждают и детализируют особенности влияния скорости превращения на термодинамический гистерезис при термоупругом мартенситном превращении.

4. Особой формой влияния скорости процесса на реальный термодинамический гистерезис является резонансное фазовое превращение, которое позволяет на порядок ускорить процесс без увеличения температуры источника тепла. Такой процесс представляет самоорганизацию системы в неравновесных условиях.

5. Полученные результаты создают основу для разработки перспективных материалов для переработки низкопотенциальных источников тепла, например, некондиционных природных термальных вод.

Список литературы

- [1] *Беляев С.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Щербакова Л.Н.* // ФММ. 1991. № 1. С. 205–207.
- [2] *Беляев С.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Мозгунов В.В.* // Вестн. ЛГУ. Сер. Механика, математика, астрономия. Л., 1985.
- [3] *Шахназаров Т.А., Камиров И.К., Исмаилов Ш.М., Биалов А.Р.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 8. С. 54–59.
- [4] *Шахназаров Т.А., Камиров И.К., Исмаилов Ш.М., Биалов А.Р.* // Сб. тр. Междунар. конф. „Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах“. Махачкала, 2002. С. 251–254.
- [5] *Шахназаров Т.А., Камиров И.К., Лугуев Т.С.* // Сб. тр. Междунар. конф. „Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах“. Махачкала, 2007. С. 432–435.
- [6] *Косилов А.Т.* // Изв. вузов. Физика. 1985. № 5. С. 54–67.
- [7] *Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. 280 с.
- [8] *Ройтбурд А.Л.* // ФТТ. 1983. Т. 26. Вып. 1. С. 33–40.
- [9] *Ройтбурд А.Л.* // УФН. 1974. Т. 113. Вып. 1. С. 69–104.
- [10] *Найш В.Е., Новоселова Т.В., Сагарадзе И.В.* ФММ. 1995. Т. 80. Вып. 5. С. 14–44.
- [11] *Хачин В.Н., Пушкин В.Г., Кондратьев В.В.* Никелид титана: структура и свойства. М.: Наука, 1992. 160 с.
- [12] *Шахназарова Т.А., Тахтарова Ю.А., Лугуев Т.С.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 10. С. 66–73.
- [13] *Полухин В.А., Ухов В.Ф., Дзугутов М.М.* Компьютерное моделирование динамики и структуры жидких кристаллов. М.: Наука, 1981. 323 с.
- [14] *Циглер Г.* Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды. М.: Мир, 1966. 135 с.
- [15] *Дьярмати И.* Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. М.: Мир, 1974. 304 с.
- [16] *Шахназаров Т.А., Камиров И.К., Мирзаев Г.М., Тахтарова Ю.А.* Способ получения никелида титана и сплавов на его основе. Патент № 2132415 с приоритетом от 27.08.1997 г.