

05.3

Динамический эффект в сплавах TiNiCu при термоупругих мартенситных превращениях

© Т.А. Шахназаров, И.К. Камилов, Ш.М. Исмаилов, А.Р. Билалов

Институт физики Дагестанского филиала РАН, Махачкала

E-mail: kamilov@datacom.ru

Поступило в Редакцию 28 июня 2001 г.

Экспериментально установлены самопроизвольные периодические колебания скорости фазового превращения при движении системы к стационарному состоянию. Оценены условия проявления и усиления этих колебаний, а также перспективы реализации.

Термоупругое взаимодействие заметно проявляется в сплавах на основе интерметаллида TiNi за счет обратного действия теплового эффекта реакции фазового превращения. Так, в работе [1] в условиях доминирования эффекта памяти формы высокая скорость появления мартенситных пластин приводила к локальному разогреву и возникновению теплового фронта, который являлся движущей силой обратного превращения и характеризовался определенным запаздыванием. В случае реализации эффекта пластичности превращения к тепловой составляющей фазовой реакции значительный вклад должна внести механическая составляющая. Если такой процесс осуществлять в условиях, предотвращающих деформацию материала, то механическое напряжение становится зависимой величиной, прямо связанной со скоростью фазового превращения. При этом появляется возможность проследить за одновременным действием тепловой и механической составляющей эффекта на скорость фазового превращения.

Экспериментально такая ситуация осуществлена нами на образцах сплава TiNiCu в виде стержня с большим отношением длины к диаметру ($l = 60 \text{ mm}$, $d = 2 \text{ mm}$). Надлежащая адиабатичность процесса достигалась теплоизоляцией стержня вакуумной рубашкой по всей длине его рабочей части. Направленность роста мартенситных пластин вдоль стержня обеспечивалась исходным растягивающим напряжением

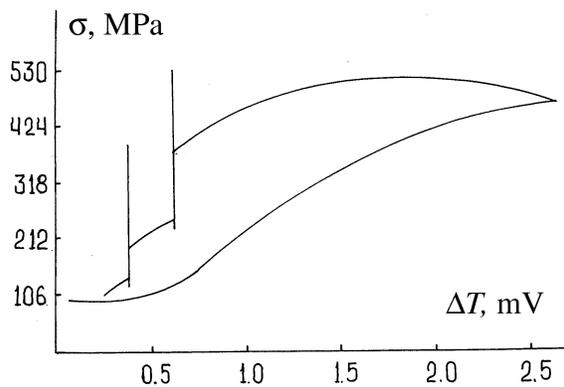


Рис. 1. Петля гистерезиса фазового превращения.

≈ 100 МПа и инициированием процесса нагревом с одного конца (обратный процесс) и охлаждением с другого (прямой процесс). В этих условиях по скорости изменения растягивающего напряжения, которое фиксировалось на испытательной машине 2099P-5, можно было оценивать среднюю скорость продвижения фронта мартенситных пластин вдоль стержня.

Результаты экспериментов показали, что при выводе системы из стационарного процесса (за счет подачи извне импульсов растягивающего напряжения) на участке прямого мартенситного превращения наблюдаются периодические колебания скорости фазового превращения (рис. 1). Временная развертка процесса на интересующем участке показала (рис. 2) довольно заметную продолжительность колебаний. На участке обратного мартенситного превращения не удалось вывести систему из стационарного процесса, что объясняется ростом реактивных напряжений и преобладанием эффекта памяти формы в этом случае [2].

Наблюдаемые нами периодические колебания скорости фазового превращения представляют собой немонотонное движение термодинамической системы к стационарному состоянию. Зависимость потоков от термодинамических сил приобретает нелинейный характер, и теорема о минимуме производства энтропии уже не выполняется [3]. Процесс фазового превращения, по существу, начинает подчиняться тем же закономерностям, что и рассасывание крупномасштабной флуктуации соответствующего типа. Но при этом, как отмечается в [4],

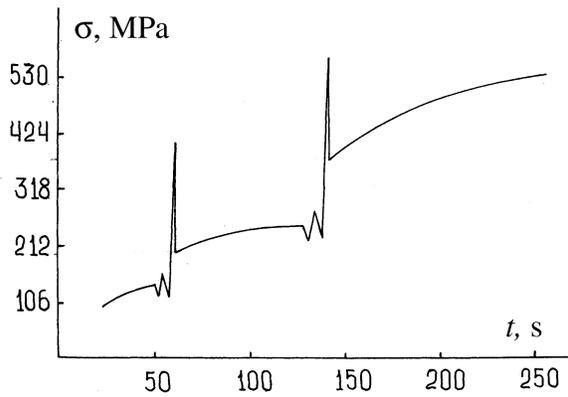


Рис. 2. Временная развертка петли на участке воздействия механического импульса.

мелкомасштабные флуктуации дают существенный вклад в ряд макрохарактеристик, „участвуют“ в формировании необратимого процесса, так как влияют на диссипацию энергии.

Решение уравнений для возмущений получается в комплексной форме и временная зависимость рассматриваемых колебаний в соответствии с [3] определяется комплексной величиной

$$\omega = \omega_r + i\omega_i, \quad (1)$$

где $i\omega_i$ — мнимая часть, описывающая колебания. Зависимость (1) проявляется, когда стационарное состояние находится на определенном удалении от положения термодинамического равновесия, что оценивается в [3] величиной химического сродства $A > 9.2 RT$. Для термоупругих мартенситных превращений оценка рассматриваемой удаленности должна осуществляться от термоупругого равновесия.

Модельные представления, развиваемые в [5], позволяют вывести баланс сил, действующих на термоупругое фазовое превращение:

$$X = \frac{\Delta\mu}{\varepsilon_s} - \sigma_i, \quad (2)$$

где $\Delta\mu$ — свободная термодинамическая сила, равная $\Lambda(T - T_0)/T_0$ (Λ — тепловой эффект реакции фазового превращения, T_0 — температура

равновесия фаз, T — текущая температура процесса), σ_i — поле внутренних напряжений, ε_s — собственная деформация превращения. Тогда для скорости термоупругого мартенситного превращения можно записать

$$J = L \left(\frac{\Delta\mu}{\varepsilon_s} - \sigma_i \right), \quad (3)$$

где $J = \varepsilon_0/\varepsilon_s$ характеризует объемную долю превращения. Под ε_0 понимают не макроскопическую пластическую деформацию в процессе фазового превращения, определяемую формоизменением всего образца (в пренебрежении объемным эффектом превращения для поликристалла она равна нулю), а среднюю по всему ансамблю кристаллов величину микроскопической деформации. L — коэффициент проводимости. Полученные зависимости (2) и (3) через суммирование свободной термодинамической силы и силы принуждения (σ_i) соответствуют принципу наименьшего принуждения Гаусса в термодинамической интерпретации [6]. При такой оценке мартенситного превращения мера удаленности его от термоупругого равновесия должна оцениваться по величине X , ибо при $X = 0$ скорость процесса становится равной нулю ($J = 0$).

При осуществлении прямого и обратного термоупругого мартенситного превращения величина X определяется как результат внешнего воздействия плюс тепловая и механическая составляющие эффекта фазового превращения. Тепловая составляющая воздействует на $\Delta\mu$, изменяя температуру в зоне фазовой реакции, а механическая составляющая изменяет значение σ_i . Конечный результат, определяющий скорость процесса, зависит как от скорости внешнего воздействия, так и от разной скорости действия тепловой и механической составляющей эффекта фазового превращения. Наблюдаемые в данной работе периодические колебания скорости фазового превращения достигаются при определенном уровне средней скорости процесса, и эффект колебаний является следствием разной скорости изменения свободной термодинамической силы и силы принуждения, что можно назвать динамическим эффектом.

Необходимо отметить, что мы не рассматриваем область эффектов, появляющихся при $A \rightarrow \infty$, т.е. при больших скоростях превращения (незатухающие колебания типа Лотка–Вольтера, реакция Жаботинского). Речь идет о немонотонном колебательном движении термодинамической системы к стационарному состоянию при умеренных скоростях процесса. Практическая значимость такого эффекта

определяется легкостью вывода системы из стационарного состояния. Известен пример [7], когда процесс фазового превращения выво-дился из стационарного состояния внешним воздействием, которое по амплитуде было на порядок меньше, чем амплитуда появляю-щихся колебаний. Такая чувствительность системы в [7] создава-лась за счет возрастания эффективности действия обратной связи и практически обеспечивала периодические колебания скорости на протяжении всего процесса фазового превращения. При термоупругих мартенситных превращениях возрастание неоднозначности обратного действия скорости процесса на свободную термодинамическую силу и силу принуждения может быть достигнуто повышением адиабати-чности процесса, подбором составов с более высокой величиной неупругой деформации, созданием градиента механического напряже-ния, направленного против градиента температуры, увеличением этих градиентов.

Способность сплавов с термоупругим мартенситным превращени-ем обратимо деформироваться в достаточно узком температурном интервале (30–50°С) позволяет их использовать при переработке низкопотенциальных (бросовых) источников тепла, что наряду с вы-сокой удельной работоспособностью (эксергией) делает неконкуренто-способными в таких условиях другие способы переработки энергии. Однако в реальных мартенситных двигателях для достижения над-лежащей скорости превращения необходимо создавать определенное переохлаждение ниже температуры начала прямой мартенситной ре-акции и достаточный перегрев выше температуры окончания обратного перехода. В результате реальный температурный интервал составляет 250–300° [8].

При мартенситных превращениях в нестационарном колебательном режиме нарушается линейная зависимость между термодинамической силой и скоростью процесса. В этих условиях отпадает вопрос об инер-ционности системы и открывается возможность обеспечения циклич-ности процесса без достижения полного мартенситного превращения. Такая возможность может быть реализована при инициировании коле-бательного процесса за счет крупномасштабных флуктуаций скорости превращения, которые закономерно проявляются при скачкообразном процессе роста мартенситных пластин, достигающих за один скачок величины в несколько микрон [9].

Список литературы

- [1] Гюнтер В.Э., Чернышев В.И., Чекалин Т.Л. // Письма в ЖТФ. Т. 26. В. 4. С. 19–24.
- [2] Беляев С.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Шербакова Л.Н. // ФММ. 1991. № 1. С. 205–207.
- [3] Ленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. 280 с.
- [4] Гуров К.П. Феноменологическая термодинамика необратимых процессов. М.: Наука, 1978. 128 с.
- [5] Косилов А.Г. // Изв. вузов. Физика. 1985. Т. 72. № 5. С. 54–67.
- [6] Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. М.: Мир, 1974. 304 с.
- [7] Шахназаров Г.А. // ЖФХ. 1980. Т. 54. № 1. С. 85–88.
- [8] Беляев С.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Мозгунов В.В. // Вестник ЛГУ. Сер. математика, механика, астрономия. Л., 1985. № 2427-85. Деп.
- [9] Кащенко М.П. Волновая модель роста мартенсита при γ - α превращении в сплавах на основе железа. Екатеринбург: Наука, 1993. 224 с.