

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НИКЕЛИДА ТИТАНА С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ НИКЕЛЯ

Мовчан А.А., Казарина С.А., Шельмагин П.В.*

*Институт прикладной механики РАН,
Москва, Ленинский проспект, 32а*

**Московский государственный авиационный институт (технический университет),
Москва, ГСП, Волоколамское шоссе, 4*

Предложена система определяющих соотношений для двухэтапного (мартенситного и ромбоздрического) фазовых превращений в никелиде титана. Приведены графики зависимостей параметров фазового состава и фазовых деформаций от температуры при нагреве и охлаждении под действием постоянных напряжений.

Даже незначительное повышение содержания никеля в никелиде титана по сравнению с равноатомным составом приводит к существенному снижению характерных температур мартенситных превращений. В результате оказываются возможными переходы из аустенитной фазы в ромбоздрическую и обратно, а также двухэтапные фазовые превращения. Качественное описание соответствующих фазовых переходов приведено в работе [1] настоящего сборника. Данная работа посвящена количественному описанию механических явлений, сопровождающих двухэтапные фазовые превращения в никелиде титана.

Для математического моделирования рассматриваемых процессов необходимо сформулировать две связанные между собой системы определяющих соотношений, первая из которых описывает изменение фазового состава при ромбоздрических и мартенситных превращениях, а вторая моделирует деформационные эффекты, сопровождающие такие превращения.

Описание изменения фазового состава основывается на гипотезах, сформулированных в [1]. Количественно степени фазовых переходов будут определяться объемными долями мартенситной q_M и аустенитной q_A фаз, а также степенью осуществления R -преобразования q_R . Последняя величина считается нормированной таким образом, чтобы выполнялось соотношение

$$q_A + q_R + q_M = 1. \quad (1)$$

Рассмотрим процесс прямого превращения. В каждой из двух косых полос (см. рис. 1 в [1]) происходит образование соответствующей (ромбоздрической или мартенситной) фазы, начинающееся при пересечении изображающей точкой начальной (верхней, левой) границы. Этот процесс подчиняется зависимостям:

$$q_R = 1 - (1 - q_R^0)(1 - f(R_s^*, R_f^*, T)), \quad (2)$$

$$q_M = 1 - (1 - q_M^0)(1 - f(M_s^*, M_f^*, T)), \quad (3)$$

где в качестве функции f , в соответствии с предложениями [2], можно выбрать

$$f(T_1, T_2, T) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{T_1 - T}{T_1 - T_2}\right), \quad (4)$$

В основу формул (2), (3) положено предположение о подобии кривых прямого превращения при изменении температуры в неполных интервалах температур фазовых переходов относительно точки окончания прямого превращения [3].

В соответствии с предположениями, сформулированными для прямого превращения, в областях А, С и G (рис. 1 [1]) фазовый состав не меняется. В области В происходит образование ромбоэдрической фазы из аустенитной, описываемое зависимостью (2), причем доля мартенситной фазы не меняется $q_M = q_M^0$, а

$$q_A = 1 - q_M - q_R, \quad (5)$$

Данный процесс продолжается до тех пор, пока изображающая точка не достигнет нижней границы полосы $T = R_f^*$, либо величина q_A , вычисленная по формуле (5) не станет равной нулю (возможна ситуация, когда величина $q_A = 0$ в начальной точке области В и процесс образования ромбоэдрической фазы вообще происходить не будет). После достижения величиной q_A нулевого значения фазовый переход прекращается и сохраняются постоянными значения $q_M = q_M^0$, $q_R = 1 - q_M^0$.

В полосе D (рис. 1 [1]) происходит образование мартенситной фазы. Величина q_M меняется при этом в соответствии с зависимостью (3). В мартенситную фазу может переходить как аустенитная, так и ромбоэдрическая фаза. Пусть в момент входа изображающей точки в рассматриваемую полосу $q_R = q_R^0$, $q_A = q_A^0$. В силу предположения 1.3 [1], в процессе рассматриваемого перехода соотношение между параметрами исходных фаз сохраняется:

$$\frac{q_R}{q_A} = \frac{q_R^0}{q_A^0}. \quad (6)$$

Кроме того,

$$q_R + q_A = 1 - q_M. \quad (7)$$

Решая систему (6), (7) можно получить

$$q_R = \frac{(1 - q_M)q_R^0}{q_R^0 + q_A^0}, \quad q_A = \frac{(1 - q_M)q_A^0}{q_R^0 + q_A^0}. \quad (8)$$

Учитывая, что $q_R^0 + q_A^0 = 1 - q_M^0$, а также формулу (3), находим:

$$q_R = q_R^0 (1 - f_1(R_s^+, R_f^+, T)), \quad q_A = q_A^0 (1 - f_1(M_s^+, M_f^+, T)). \quad (9)$$

Далее рассматривается обратное превращение. Уменьшение параметра некоторой фазы (мартенситной или ромбоэдрической) при обратном превращении начинается с момента, когда изображающая точка пересекает начальную (нижнюю, правую) границу соответствующей полосы (т.е. линии M_f^- или R_f^-). Заканчивается это уменьшение обращением в нуль соответствующего параметра при пересечении изображающей точкой конечной (верхней, левой) границы полос. Уменьшение параметра исходной фазы при пересечении соответствующей полосы определяется зависимостями:

$$q_M = q_M^0 f(M_f^-, M_s^-, T), \quad (10)$$

$$q_R = q_R^0 f(R_f^-, R_s^-, T), \quad (11)$$

где q_M^0 или q_R^0 — значения рассматриваемого параметра в момент пересечения изображающей точкой начальной границы соответствующей полосы. В (10), (11) использовано предположение о подобии кривых обратного превращения при изменении температуры в неполных интервалах температур превращений относительно точки окончания обратного превращения [3].

Формулы (10), (11) справедливы независимо от того, каков конечный продукт фазового перехода. При пересечении R – полосы в процессе обратного превращения, если одновременно не происходит пересечения M – полосы, ромбоздрическая фаза может переходить только в аустенитную. Поэтому величина q_M сохраняет постоянное значение: $q_M = q_M^0$. Величина q_R убывает в соответствии с формулой (11), а $q_A = 1 - q_R$. Если происходит пересечение полосы мартенситного преобразования без пересечения полосы ромбоздрической, то ситуация с конечным продуктом зависит от того, выше или ниже ромбоздрической полосы находится изображающая точка. Если она находится ниже (случай небольших напряжений), то параметр аустенитной фазы будет сохранять постоянное значение $q_A = q_A^0$, параметр мартенситной фазы будет уменьшаться в соответствии с (10), а $q_R = 1 - q_M - q_A^0$. Процесс будет описываться данными соотношениями, пока изображающая точка не покинет полосы мартенситного превращения, либо пока значение q_R не достигнет значения нуля.

Если в процессе обратного превращения точка, изображающая состояние материала, пересекает одновременно ромбоздрическую и мартенситную полосы, то изменение параметров q_M и q_R будет определяться формулами (10), (11), а $q_A = 1 - q_R - q_M$.

Система уравнений, определяющая развитие фазовых деформаций, имеет вид:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^R + \varepsilon_{ij}^M,$$

$$d\varepsilon_{ij}^R = (c_0^R \sigma_{ij}^R + a_0^R \varepsilon_{ij}^R) dq_R, \quad d\varepsilon_{ij}^M = (c_0^M \sigma_{ij}^M + a_0^M \varepsilon_{ij}^M) dq_M$$

при прямом превращении и

$$d\varepsilon_{ij}^R = \left(\frac{a_0^R \varepsilon_{ij}^R}{\exp(a_0^R q_R^0) - 1} + a_0^R \varepsilon_{ij}^R \right) dq_R, \quad d\varepsilon_{ij}^M = \left(\frac{a_0^M \varepsilon_{ij}^M}{\exp(a_0^M q_M^0) - 1} + a_0^M \varepsilon_{ij}^M \right) dq_M$$

при обратном превращении.

Здесь для упрощения при обратных превращениях не учитывается реверсивный эффект памяти формы, а при прямых превращениях пренебрегается объемным эффектом реакции; ε_{ij} , ε_{ij}^M , ε_{ij}^R – суммарная фазовая деформация; фазовая деформация, связанная с ромбоздрическим и мартенситным преобразованием; q_0^R , ε_{0ij}^R – для рассматриваемого этапа обратного превращения значения параметра ромбоздрической фазы и соответствующей фазовой деформации в начальной точке этого этапа; q_0^M , ε_{0ij}^M – аналогичные величины для обратного мартенситного перехода; a_0^R , a_0^M , c_0^R , c_0^M – параметры материала. Уравнения для деформации мартенситного превращения получены в [2-4] исходя из микромеханической схемы, моделирующей одновременно происходящие процессы зарождения и развития кристаллов мартенсита в аустенитной матрице. Уравнения для деформации R – превращения написаны по аналогии, с учетом того факта, что максимальная деформация прямого R – превращения пропорциональна действующему напряжению.

Следует экспериментальным данным [5], эффект ориентированного превращения при прямом R – переходе выражен значительно слабее, чем при прямом мартенситном превращении, что легко объяснить исходя из физики этих явлений. Действительно, причиной ориентированного превращения является рост кристаллов мартенсита, зародившихся тогда, когда еще действовало внешнее напряжение и ориентированных этим напряжением. В случае же R – превращения, следуя представлениям об этом процессе, изложенным в [6], происходит искажение кубической решетки, которое не представляется в виде одновременно происходящих процессов зарождения и развития кристаллов новой фазы. Следовательно, основной механизм явления ориентированного превращения в случае R – перехода отсутствует.

В микромеханической модели мартенситного превращения интенсивность процесса развития кристаллов определяется величиной параметра материала a_0 . Этот же параметр определяет величину деформационного эффекта ориентированного превращения. Естественно предположить поэтому, что для R- превращения параметр a_0^R мал. В первом приближении можно считать $a_0^R = 0$. В результате получается упрощенный вариант соотношений для R- превращения:

$$d\epsilon_0^R = c_0^R \sigma_0^R dq_R, \quad d\epsilon_0^R = \left(\frac{\epsilon_{0M}^R}{q_R} \right) dq_R$$

для прямого и обратного превращения соответственно.

Ниже в качестве иллюстрации приведены некоторые результаты анализа поведения никелида титана при прямом и обратном превращении под действием постоянного напряжения $\sigma = 180$ МПа. Рис. 1 и 4 относятся к полному превращению в мартенситную фазу при охлаждении, когда последующее обратное превращение происходит из однофазного состояния. Данные на рис. 2, 3 соответствуют неполному прямому превращению, когда нагрев происходит из двухфазного (B1'+B2) – состояния.

На рис. 1 и 2 приведены графики изменения фазового состава (сплошная линия соответствует параметру мартенситной, штриховая – ромбоздрической, а точечная – аустенитной фаз).

На рис. 3, 4 приведены графики зависимости фазовой деформации от температуры. Температура окончания процесса прямого превращения, изображенного на рис. 3 подобрана так, чтобы в конечной точке этого перехода выполняется условие $q_R = q_M$, $q_A = 0$.

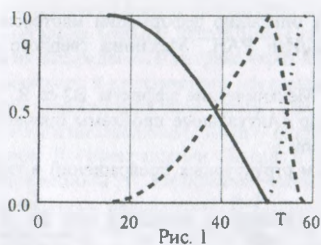


Рис. 1

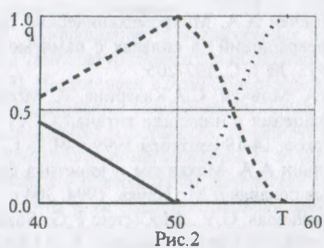


Рис. 2

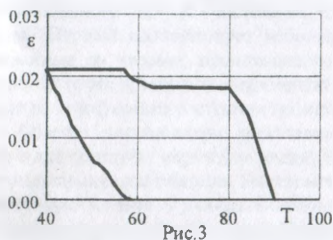


Рис. 3

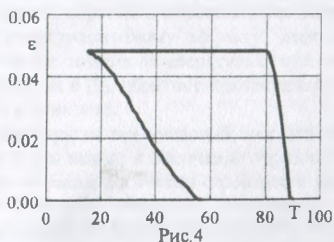


Рис. 4

Как видно, в этом случае двухэтапным является как прямое, так и обратное превращения, причем для обратного превращения низкодеформационный этап предшествует высокодеформационному. На рис. 4 изображено решение той же задачи, но прямое превращение доведено до полностью мартенситного состояния. В данном случае обратное превращение носит одноэтапный характер. Такое поведение материала полностью соответствует экспериментальным данным [7]. С помощью предлагаемой модели количественно и качественно правильно описываются не только явления прямого и обратного превращения под действием постоянного напряжения, но и явления мартенситной и R – неупругости и псевдоупругости при изотермическом активном нагружении из аустенитного состояния.

Работа выполнена при финансовом содействии РФФИ (проект № 99-01-01187).

Список литературы

1. Мовчан А. А., Казарина С. А., Шелымагин П. В., Пузикова Т. В. Качественное описание двухэтапного фазового превращения в никелиде титана // Физика процессов деформации и разрушения и прогнозирование механического поведения материалов. Сборник трудов XXXVI семинара «Актуальные проблемы прочности». - Витебск, 2000. С. 353-358.
2. Мовчан А. А. Выбор аппроксимации фазовой диаграммы и модели исчезновения кристаллов мартенсита для сплавов с памятью формы // Журнал прикладной механики и технической физики. 1995. Т. 36. № 2. С. 173-181.
3. Мовчан А. А. Микромеханические определяющие уравнения для сплавов с памятью формы // Проблемы машиностроения и надежности машин (Машиноведение). 1994. № 6. С. 47-53.
4. Мовчан А. А. Микромеханический подход к описанию деформации мартенситных превращений в сплавах с памятью формы // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1995. № 1. С. 197-205.
5. А. А. Мовчан, С. А. Казарина, А. Мозафари. Механические эффекты $B2 \leftrightarrow R$ превращения в никелиде титана // XXXV семинар «Актуальные проблемы прочности». Псков. 14-19 сентября 1999 г. - Ч. 1 - С. 156 – 160.
6. Ильин А. А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах // М.: Наука, 1994. 304 с.
7. Stachowiak G. V., McCormic P. G. Shape memory behavior associated with the R and martensitic transformations // Acta Metallurgica. - 1988. - V. 36. - No 2. - P. 292-297.