

КИНЕТИКА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА В СПЛАВЕ TiNi

¹Реснина Н.Н., ¹Беляев С.П., ¹Демидова Е.С., ¹Иванов А.М., ²Андреев В.А.

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ»,

г. Москва, Россия, E-mail: st033007@student.spbu.ru

Согласно принятой теории, термоупругое мартенситное превращение это фазовый переход первого рода, который протекает в кристаллических телах при изменении температуры или приложении нагрузки. Считается, что такой переход является атермическим и не зависит от времени, то есть, в условиях изотермической выдержки доля мартенситной фазы остается постоянной [1]. Однако к настоящему времени существует ряд работ, в которых показано, что в некоторых сплавах доля мартенситной фазы может увеличиваться при выдержке в условиях постоянной температуры [2-6]. В частности, в работах [2-4] наблюдали изотермический мартенситный переход в сплаве TiNi при температурах как ниже, так и выше температуры начала мартенситного превращения M_s .

Для изучения кинетики изотермических мартенситных превращений необходимо определить влияние температуры и длительности выдержки на долю изотермически образованного мартенсита. Построить зависимости доли превращенного материала от времени и температуры выдержки на основе известных данных не представляется возможным, поскольку они были получены с помощью методик измерения электросопротивления или внутреннего трения. Изменение этих физических величин может быть связано с многими факторами (изменение дефектной структуры, фазовые переходы, процессы релаксации и т.д.), поэтому данные методики не позволяют получить точную оценку количества материала, изотермически перешедшего в новую фазу. Решить эту задачу позволяет методика дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). В связи с этим целью данной работы стало изучение изменения доли превращенного материала со временем в условиях изотермической выдержки при различных температурах с помощью метода ДСК.

В работе были использованы образцы сплава Ti-50,7 ат. %Ni (МАТЭК-СПФ), предварительно закаленные в воде от 850 °С. При охлаждении и нагревании образцов в полном температурном интервале мартенситных превращений сплав претерпевает прямой мартенситный переход $B2 \rightarrow B19'$ при охлаждении при температурах $M_{н.я} = -60$ °С, $M_k = -77$ °С, и обратный переход $B19' \rightarrow B2$ при нагревании при температурах $A_n = -30$ °С, $A_k = -16$ °С. Для получения зависимостей объемной доли превращенного материала от температуры и длительности выдержки образцы охлаждали до температуры выше M_n , выдерживали при постоянной температуре и нагревали до температуры выше температуры конца обратного перехода. Долю материала, изотермически перешедшего в мартенситную фазу, определяли как величину, пропорциональную теплоте, выделенной при нагревании образца после изотермической выдержки.

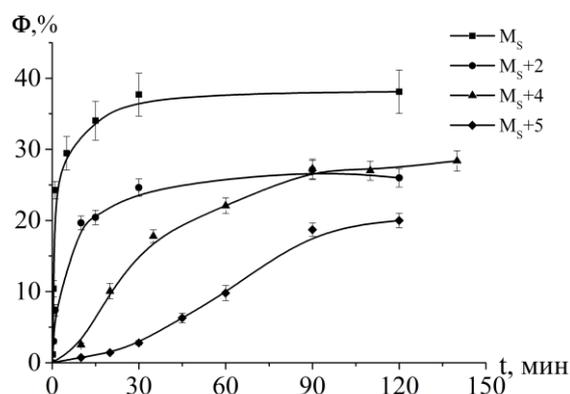


Рисунок 1 – Зависимость доли изотермически образованного мартенсита от времени для разных температур выдержки

Установлено, что в закаленном сплаве Ti–50,7 ат. %Ni прямое мартенситное превращение B2→B19' реализуется в условиях изотермической выдержки при температурах M_s и выше. На рисунке 1 представлены зависимости доли превращенного материала от времени, полученные для разных температур выдержки. Установлено, что для всех температур с увеличением длительности выдержки доля превращенного материала возрастает до определенного значения, после чего остается постоянной. Величина максимальной доли изотермически превращенного материала зависит от температуры выдержки и уменьшается с ее увеличением. Максимальная доля изотермически образованного мартенсита была достигнута при температуре выдержки равной M_s и составила 40%.

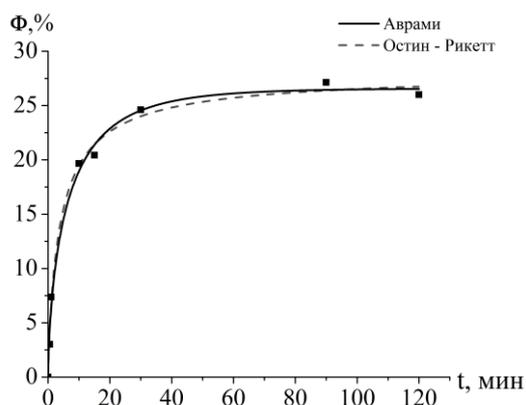


Рисунок 2 –Зависимости доли изотермически превращенного мартенсита от длительности выдержки для температуры выдержки M_s+2 : экспериментальные данные (точки) и теоретические зависимости (линии), вычисленные согласно теориям Остина-Рикетта и Аврами [7]

Для описания экспериментальных данных использовали две различные теоретические модели (теория Аврами и соотношение Остина-Рикетта), которые описывают процессы зарождения и роста новой фазы. Согласно теории Аврами [7] в условиях изотермической выдержки доля превращенного материала зависит от длительности выдержки следующим образом:

$$\Phi = f \cdot (1 - e^{-k \cdot t^n}), \quad (1)$$

где f , k и n коэффициенты, зависящие от температуры выдержки и не зависящие от времени. Теоретическая модель Остина-Рикетта [7] устанавливает следующую зависимость $\Phi(t)$:

$$\Phi = f \cdot \frac{k \cdot t^n}{1 + k \cdot t^n}, \quad (2)$$

где f , k и n , как и в модели Аврами, зависят только от температуры выдержки [7]. Используя формулы (1) и (2) были подобраны коэффициенты для обеих моделей по экспериментальным зависимостям, представленным на рисунке 1. После этого были подобраны формулы, описывающие зависимости коэффициентов от температуры выдержки и проведен расчет доли мартенсита, превращенного в изотермических условиях, от длительности выдержки с учетом зависимостей коэффициентов f , k , n , от температуры. Показано, что оба теоретических приближения позволяют хорошо описать экспериментальные данные (рис.2).

Таким образом, в ходе работы получены следующие выводы:

- Прямое мартенситное превращение B2 →B19' в сплаве Ti – 50,7 ат. %Ni может быть реализовано в условиях изотермической выдержки при температурах M_n и выше;

- вне зависимости от температуры выдержки увеличение длительности выдержки приводит к увеличению доли изотермически образованного мартенсита до достижения определенного значения, которое зависит от температуры выдержки. Максимальная доля материала, изотермически перешедшего в новую фазу, составляет 40% и наблюдается при температуре выдержки равной M_s ;

- теоретические модели Авраами и Остина-Рикетта позволяют описать кинетику изотермического превращения в закаленном сплаве Ti-50,7 ат. %Ni.

Список литературы:

1. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys//Progress in Materials Science. – 2005. – V.50. – P. 511-678.

2. Kustov S., Salas D., Cesari E., Santamarta R., Van Humbeeck J. Isothermal and athermal martensitic transformations in Ni-Ti shape memory alloys// Acta Materialia. – 2012. – V. 60. – P. 2578-2592.

3. Fukuda T., Yoshida S., Kakeshita T. Isothermal nature of the B2-B19' martensitic transformation in a Ti-51.2Ni (at.%) alloy//Scripta Materialia. – 2013. – V. 68. – P. 984-987.

4. Ji Y., Wang D., Ding X., Otsuka K., Ren X. Origin of an Isothermal R-Martensite Formation in Ni-rich Ti-Ni Solid Solution: Crystallization of Strain Glass// Physical Review Letters. – 2015. – V. 114. – P. 055701-1 - 055701-5.

5. Reyhani M.M., McCormick P.G. Isothermal martensitic transformation and shape memory in a Cu-Zn-Al alloy//Scripta metallurgica. – 1987. – V. 21. – P. 549-554.

6. Chang S.H., Wu S.K. Internal friction of B2→B19' martensitic transformation of Ti₅₀Ni₅₀ shape memory alloy under isothermal conditions//Materials Science and Engineering A. – 2007. – P. 379-383.

7. Avrami M. Kinetics of Phase Change. II Transformation-Time-Relations for Random Distribution of Nuclei//Journal of Chemical Physics. – 1940. – V. 8. – P. 212-224.