

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОУПРУГИХ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В

СПЛАВЕ $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$

Реснина Н.Н.¹, Беляев С.П.^{1,3}, Шеляков А.В.², Коноплева Р.Ф.³, Чеканов В.А.³,
Рубаник В.В.⁴, Рубаник В.В. мл.⁵

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

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³ Петербургский институт ядерной физики НИЦ «Курчатовский институт»,
Гатчина, Россия

⁴ Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь

⁵ Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь
resnat@mail.ru

Термоупругое мартенситное превращение $B2 \leftrightarrow B19'$ в сплаве $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ характеризуются необычными параметрами – широким интервалом обратного перехода и большим гистерезисом и узким температурным интервалом прямого превращения [1]. Такие параметры не типичны для превращения этого типа [2], поэтому было высказано предположение о том, что мартенситное превращение в исследуемом сплаве теряет признаки термоупругого перехода. Однако этот сплав проявляет хорошие функциональные свойства, так, величина полностью восстанавливаемой деформации превосходит 5% [3]. Вместе с тем, нетермоупругие мартенситные переходы не могут быть причиной такой высокой обратимой деформации, следовательно, необычная кинетика этого превращения может быть обусловлена иными причинами. Таким образом, целью данной работы явилось изучение особенностей термоупругих

мартенситных превращений в сплаве $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$.

Для достижения цели исследования фазовые переходы были изучены с помощью нескольких независимых методик: дифференциальной сканирующей калориметрии, измерения электросопротивления, динамического механического анализа, просвечивающей микроскопией, рентгеноструктурного

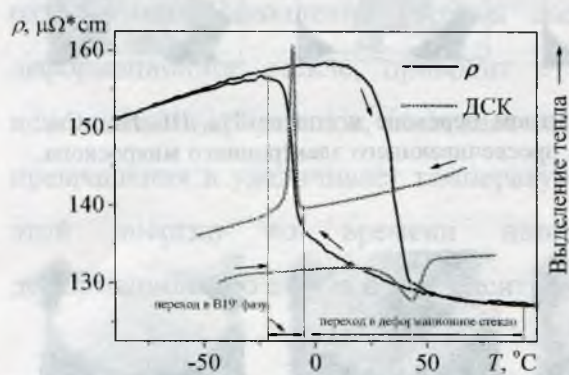


Рисунок 1. Калориметрическая кривая (серая линия) и зависимость $\rho(T)$ (черная линия), полученные при охлаждении и нагревании сплава $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$

анализа. Полученные результаты показали, что в исследуемом сплаве прямому мартенситному превращению предшествует переход в деформационное стекло (рис. 1). Этот переход сопровождается аномальным изменением электросопротивления, частотно-зависимым пиком внутреннего трения, при этом структура сплава сохраняет

кубическую B2 фазу. Обратное превращение происходит напрямую из моноклинной B19' фазы в кубическую B2 фазу без образования деформационного стекла.

Превращение в деформационное стекло приводит к накоплению значительной упругой энергии в предмартенситной области, которая оказывает влияние на параметры прямого мартенситного превращения (понижает температуру M_n и A_n) и приводит к проявлению новых эффектов. Во-первых, термодинамические условия появления мартенситных кристаллов при охлаждении и их исчезновения при нагревании оказываются нетождественными друг другу, из-за того, что обратный переход идет без образования деформационного стекла. Это приводит к тому, что последовательность образования и исчезновения кристаллов нарушается. Это подтверждается экспериментальными данными, полученными in-situ в просвечивающем электронном микроскопе при охлаждении и нагревании (рис. 2 - 3). При этом обратное превращение реализуется за счет обратного движения межфазной границы (рис. 3), т.е. признак термоупругости фазового перехода сохраняется.

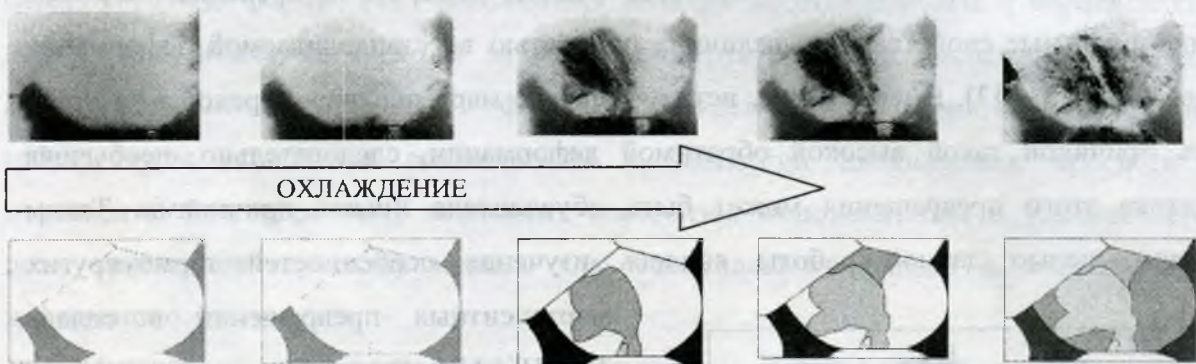


Рисунок 2. Изменение структуры при прямом мартенситном переходе в сплаве $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$. Верхний ряд – кадры из видеопленки, снятого в колонне просвечивающего электронного микроскопа. Нижний ряд – нарисованные картинки.

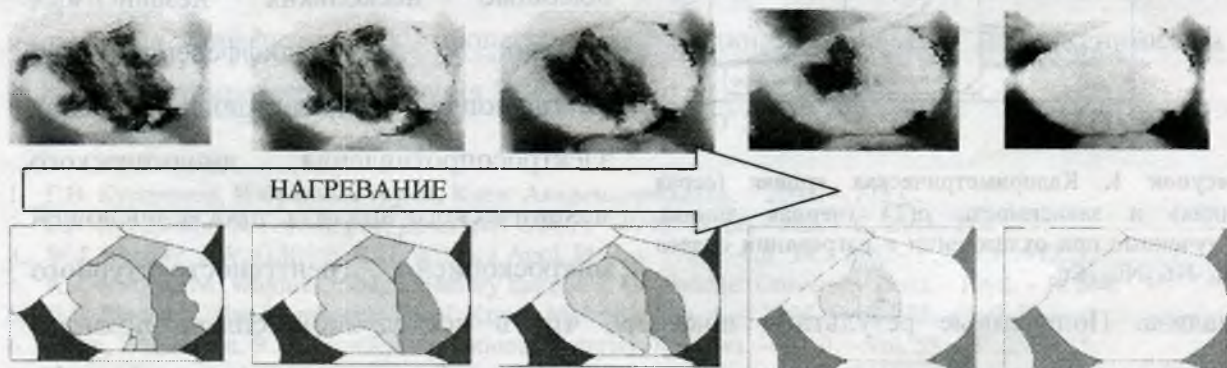


Рисунок 3. Изменение структуры при обратном мартенситном переходе в сплаве $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$. Верхний ряд – кадры из видеопленки, снятого в колонне просвечивающего электронного микроскопа. Нижний ряд – нарисованные картинки.

Во вторых, релаксация упругой энергии, накопленной при переходе в деформационное стекло, приводит к тому, что прямое мартенситное превращение происходит при постоянной температуре, т.е. реализуется изотермически. На рисунке 4 видно, что изотермическое превращение реализуется в узком интервале температур, превышающих температуру M_n , при этом при постоянной температуре может превращаться в мартенситную фазу до 70% объема сплава.

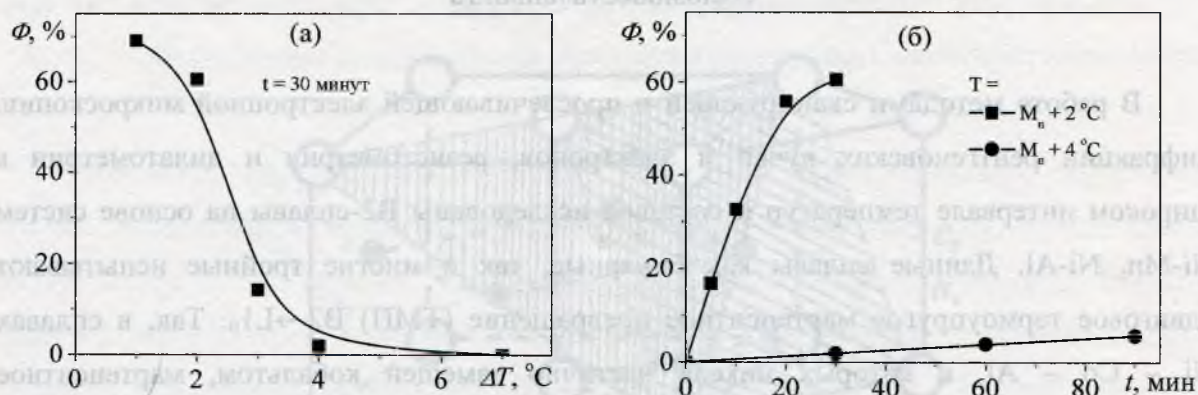


Рисунок 4. Зависимости объемной доли сплава $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$, превращающейся в мартенситную фазу при постоянной температуре от разности температур $\Delta T = T - M_n$ (выдержка 30 минут) (а); от времени выдержки при температурах $T = M_n + 2^\circ C$ и $T = M_n + 4^\circ C$. Температура $M_n = -7^\circ C$ была определена по калориметрическим кривым, полученным при непрерывном охлаждении и нагревании со скоростью $10^\circ C/мин$

Таким образом, полученные результаты показали, что необычная кинетика термоупругого мартенситного перехода в сплаве $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ связана с образованием деформационного стекла, которое предшествует прямому переходу при охлаждении. Накопление упругой энергии, которое происходит при переходе в деформационное стекло, приводит к изменению последовательности появления и исчезновения кристаллов, понижает температуры M_n и A_n , что расширяет гистерезис превращения и увеличивает температурный интервал обратного перехода. Релаксация этой энергии во времени инициирует изотермическое превращение из деформационного стекла в мартенситную B19' фазу.

Работа выполнена в рамках проекта 0.37.177.2014, финансируемого Санкт-Петербургским государственным университетом.

1. N.Resnina, S. Belyaev and A. Shelyakov, EPJ ST 158, 21 (2008)
2. K. Otsuka and X. Ren, Progr. Mater. Sci. 50, 511 (2005)
3. S. Belyaev, N. Resnina and V. Slesarenko, Smart Mater. Struct. 20, (2011).