

ОСОБЕННОСТИ ЭФФЕКТОВ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ПАМЯТИ ФОРМЫ В [001] МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА Ni-Fe-Ga

¹Беляев С.П., ²Николаев В.И., ¹Реснина Н.Н., ²Тимашов Р.Б., ¹Сибирев А.В.,
²Аверкин А.И., ¹Газизуллина А.Р.

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

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: spbelyaev@mail.ru

Сплавы с памятью формы на основе Ni-Fe-Ga представляют большой интерес как материалы, чьи функциональные свойства сопоставимы со свойствами сплава TiNi, который является самым используемым сплавом с памятью формы. В работах [1] показано, что в монокристаллах Ni-Fe-Ga величина эффекта псевдоупругости может достигать 20 %, а сам эффект наблюдается в широком интервале температур. Такое поведение связано с тем, что в сплаве может реализовываться последовательность $L2_1 \leftrightarrow 10M \leftrightarrow 14M \leftrightarrow L1_0$ термоупругих мартенситных переходов при нагрузке и разгрузке [2], что и обеспечивает высокое значение обратимой деформации. В работе [3] отмечено, что величина обратимой деформации в цикле «охлаждение-нагревание» немонотонно зависит от приложенного напряжения, что нехарактерно для сплавов с памятью формы. Причина этого явления не была установлена, поэтому целью данной работы явилось изучение особенностей реализации эффектов пластичности превращения и памяти формы в монокристаллах сплава Ni-Fe-Ga.

В качестве объектов исследования были выбраны монокристаллы сплава $Ni_{55}Fe_{18}Ga_{27}$ с ориентацией [001], выращенные методом Чохральского. Образцы предварительно были закалены от 950 °С в воду и отожжены при температуре 600 °С 3 часа, в результате чего образовались $L2_1$ и γ фазы. На основе данных рентгеноструктурного анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии установлено, что при охлаждении и нагревании фаза $L2_1$ претерпевает термоупругое мартенситное превращение $L2_1 \leftrightarrow 10M$ при температурах: $M_s=50^\circ\text{C}$, $M_f=40^\circ\text{C}$, $A_s=53^\circ\text{C}$, $A_f=63^\circ\text{C}$. Для исследования эффекта пластичности превращения и памяти формы образцы размером 4x4x8мм, вырезанные вдоль оси [001], устанавливали в реверсную рамку испытательной установки Shimadzu 50kN-AG, оснащенной криотермокамерой,

нагревали до температуры 120°С, нагружали сжимающим напряжением 50–200 МПа и охлаждали под постоянным напряжением до температуры 25°С. После этого образцы нагревали до температуры 120°С под напряжением или без напряжения.

На рисунке 1 представлена типичная зависимость деформации от температуры, полученная при охлаждении и нагревании [001] монокристаллов сплава $Ni_{55}Fe_{18}Ga_{27}$ под напряжением 50 МПа. Видно, что при охлаждении монокристаллов деформация накапливается и наблюдается эффект пластичности превращения, а при нагревании

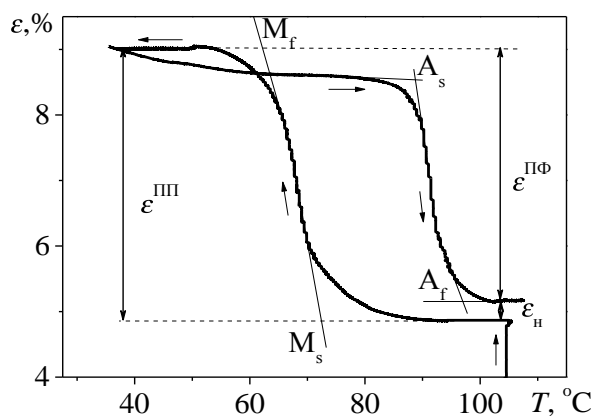


Рисунок 1 – Изменение деформации при охлаждении и нагревании сплава под напряжением 50 МПа

деформация восстанавливается, что свидетельствует о проявлении эффекта памяти формы.

По зависимостям $\varepsilon(T)$ были определены величины эффектов пластичности превращения ($\varepsilon^{ПП}$), памяти формы ($\varepsilon^{ПФ}$), деформации и температуры мартенситных переходов (M_s , M_f , A_s , A_f) так, как указано на рисунке 1. На рисунке 2,а представлены зависимости величин эффектов пластичности превращения и памяти формы от напряжения, которое действовало при охлаждении и нагревании. Установлено, что при увеличении напряжения значения эффектов пластичности превращения и памяти

формы уменьшаются (рис.2,а). На рисунке 2,б представлены зависимости температур мартенситных переходов от напряжения. Показано, что увеличение напряжения, действующего при охлаждении и нагревании, увеличивает температуры мартенситных переходов, и зависимость температур от напряжения подчиняется закону типа Клаузиуса-Клапейрона, в котором значение $dT/d\sigma$ равно $0.32 \pm 0,35$ °С/МПа.

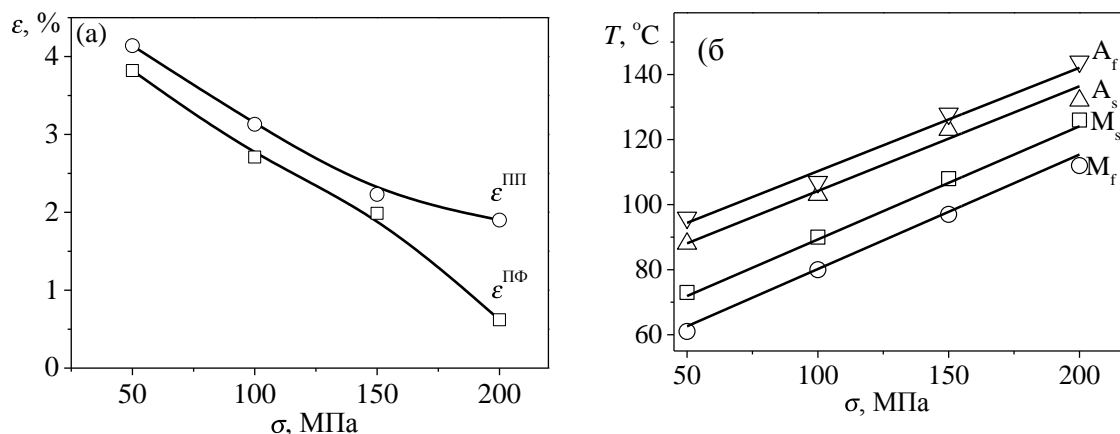


Рисунок 2 – Зависимости величин эффектов пластичности превращения и памяти формы (а) и температур мартенситных переходов (б) от величины напряжения, действующего при охлаждении и нагревании образцов монокристалла [001] сплава $\text{Ni}_{55}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}$

В обычных сплавах с памятью формы увеличение напряжения, действующего при охлаждении и нагревании, приводит к увеличению значений эффектов пластичности превращения и памяти формы. Это связано с тем, что чем больше величина напряжения, тем больше ориентированных кристаллов мартенсита возникнет при охлаждении и тем больше будет деформация, которая связана с этими ориентированными кристаллами. Чем больше деформации появится при охлаждении за счет образования ориентированных кристаллов мартенсита, тем больше деформации исчезнет при нагревании, когда ориентированные кристаллы мартенсита трансформируются в аустенит. В монокристаллах [001] исследуемого сплава увеличение напряжения приводит к понижению величин эффектов пластичности превращения и памяти формы. Это указывает на то, что увеличение напряжения уменьшает долю ориентированного мартенсита, который появляется при охлаждении. Уменьшение доли ориентированного мартенсита может быть связано с возникновением большой пластической деформации, которая подавляет мартенситные переходы. Однако результаты, представленные на рисунке 2,б, показывают, что величина пластической (необратимой) деформации при охлаждении и нагревании невелика, и ее значение составляет 1,3 % при охлаждении и нагревании под напряжением 200 МПа. Таким образом, результаты проекта показали, что напряжение аномально влияет на величины эффектов пластичности превращения и памяти формы и это не связано с появлением большой пластической деформации. Сделано предположение о том, что аномальное поведение связано с тем, что уже при нагрузке материал частично переходит в мартенситное состояние, поэтому доля сплава, который может перейти в мартенсит при охлаждении уменьшается.

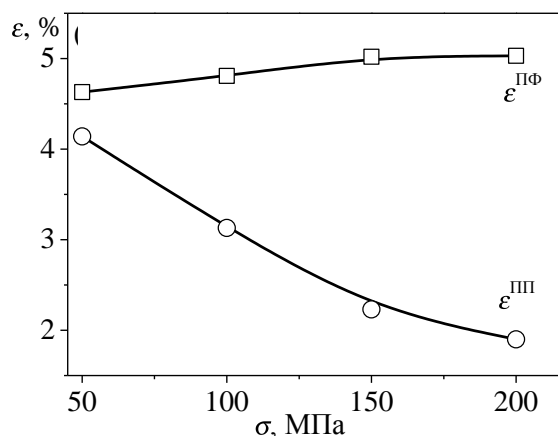


Рисунок 3 – Зависимости величин эффектов пластичности превращения и памяти формы от величины напряжения, действующего при охлаждении образцов монокристалла [001] сплава $\text{Ni}_{55}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}$

Для того, чтобы проверить это предположение провели серию экспериментов, в которых нагревание осуществляли без нагрузки. В этом случае при нагревании переходит в аустенит как мартенсит, полученный при охлаждении, так и при нагрузке. На рисунке 3 представлены зависимости величины эффекта пластичности превращения и памяти формы от напряжения, действующего при охлаждении. Видно, что нагревание в свободном состоянии приводит к существенному возрастанию величины эффекта памяти формы. Это подтверждает предположение о том, что при нагрузке в аустенитном состоянии, сплав частично переходит в мартенситную фазу, которая остается

стабильной при изменении температуры в том случае, если напряжение действует при охлаждении и нагревании. Если при нагревании напряжение не действует, то мартенсит, появившийся при нагрузке, оказывается стабильным при охлаждении и не стабильным при последующем нагревании, что и дает дополнительный вклад в величину эффекта памяти формы. Увеличение напряжения, действующего при охлаждении, приводит к увеличению значения эффекта памяти формы от 4,6 % при $\sigma=50$ МПа до 5 % при $\sigma=150$ МПа. Увеличение напряжения до 200 МПа не влияет на величину эффекта памяти формы и это связано с тем, что значение 5% является близким к кристаллографическому ресурсу изменения деформации при $L2_1 \rightarrow 10M$ мартенситном переходе. Таким образом, причиной аномального уменьшения величины обратимой деформации при возрастании напряжений при охлаждении является появление мартенситной фазы при нагрузке, что уменьшает долю материала, в котором реализуется превращение при охлаждении.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00346.

Список литературы:

1. С. Efstathiou, Н. Sehitoglu, J. Carroll, J. Lambros, Н. J. Maier, Acta Materialia 56 (2008) 3791–3799.
2. Y. Sutou, N. Kamiya, T. Omori, R. Kainuma, K. Ishida, K. Oikawa, Applied Physics Letters 84 (2004) 1275-1277.
3. Е.Е. Тимофеева, Е.Ю. Панченко, Ю.И. Чумляков, А.И. Тагильцев, Известия ВУЗов. Физика 57 (2014) 105-113.