

**ВЗРЫВНОЙ ХАРАКТЕР ДЕФОРМАЦИИ ПАМЯТИ ФОРМЫ И ГЕНЕРАЦИЯ РЕАКТИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КРИСТАЛЛАХ СПЛАВА Cu-Al-Ni**

Малыгин Г.А., Николаев В.И., Пульнев С.А., Аверкин А.И., Якушев П.Н.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*

malygin.ga@mail.ioffe.ru

Монокристаллы сплавов с эффектом памяти формы обладают более высокими значениями обратимой деформации памяти формы (ПФ), достигающими 9-15 %, и проявляют ряд эффектов, не наблюдаемых в поликристаллическом состоянии этих сплавов. В настоящей работе сообщается о двух таких эффектах: 1) взрывном характере реализации деформации памяти формы в монокристаллах сплава Cu-Al-Ni и генерации реактивных напряжений в кристаллах этого сплава в условиях стесненной деформации ПФ.

В [1] было обнаружено, что характер реализации деформации ПФ при нагреве предварительно деформированных сжатием кристаллов сплава Ni-Fe-Ga-Co зависит от их кристаллографической ориентации при сжатии [1]. Если сжатие производится в направлении оси кристалла [100], реализация деформации ПФ при нагреве осуществляется плавно в температурном интервале 4 К и при температуре 297 К, характерной для обратного мартенситного превращения этого сплава. Если же сжатие осуществляется вдоль оси [110], то диаграмма сжатия, в отличие от сжатия вдоль оси [001], имеет нестабильный характер и содержит плавные сбросы (скачки) напряжения. Реализация деформации ПФ при нагреве имеет взрывной характер, протекает в очень узком температурном интервале  $< 10^{-3}$  К и при температуре на 64 К выше температуры равновесного мартенситного перехода.

Цель настоящей работы состояла в исследовании вопроса, насколько наблюдаемый в [1] взрывной характер реализации ПФ имеет общий характер и наблюдает ли он в монокристаллах других сплавов с ЭПФ. Для исследования был выбран сплав Cu-Al-Ni, близкий по составу к эвтектоидному. На рис. 1 показаны две диаграммы сжатия кристаллов этого сплава вдоль кристаллографической оси [100]: одна – стабильная (кривая 1), другая – не стабильная, содержащая плавные скачки-сбросы напряжения (кривая 2). Нагрев кристалла с нестабильной диаграммой сжатия показал, что деформация ПФ в нем реализуется взрывным образом.

На рисунке 2 в двух масштабах (кривые 1 и 2) приведена запись с помощью лазерного интерферометра начальной скорости  $V$  восстановления формы (высоты)



этого кристалла, нагруженного дополнительной массой 400 г. Видно, что при  $T > 398$  К наступает взрывная реализация деформации ПФ при температуре на 74 К выше

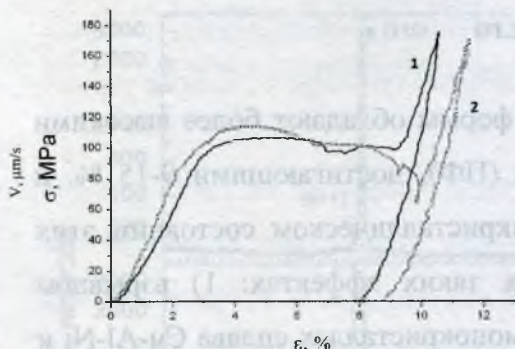


Рисунок 1. Диаграммы сжатия кристаллов Cu-Al-Ni

Рисунок 2. Скорость восстановления высоты кристалла сплава Cu-Al-Ni при нагреве

температуры обратного мартенситного перехода в этом сплаве ( $\beta'_1 \rightarrow \beta$ ) и в очень узком температурном интервале. Видеозапись подскока свободно стоящего на твердой опоре кристалла с дополнительной массой показала, что высота его подскока вместе с грузом составляет 55 мм, что соответствует начальной скорости отрыва кристалла с грузом от опоры  $V_0 \approx 1$  м/с.

Таким образом, в обоих исследованных сплавах необходимым условием взрывной реализации деформации ПФ является существование на диаграммах их сжатия скачков напряжения, связанных, как можно предполагать, с образованием нестабильных мартенситных фаз: в сплаве Ni-Fe-Ga-Co – орторомбического мартенсита, в сплаве Cu-Al-Ni -  $\gamma'_1$  - мартенсита. Сдвиг температур их обратных переходов на десятки градусов в сторону высоких температур указывает на то, что их межфазные границы заблокированы препятствиями. Такими препятствиями могут быть решеточные дислокации, возникшие в результате нестабильного характера образования мартенситов напряжения. Взрывной характер реализации деформации ПФ свидетельствует о лавинообразном характере отрыве межфазных границ от препятствий. Модель взрывного характера реализации деформации ПФ рассмотрена в [2].

Реактивные напряжения возникают в условиях стесненной реализации деформации памяти формы, т.е. в условиях отсутствия свободной реализации этой деформации, как это имело место выше (рис. 2). На рисунке 3 приведены кривые генерации реактивных напряжений в кристаллах сплава Cu-Al-Ni, предварительно



деформированных сжатием до разных деформаций от 0.1% до 8.2 % (врезка на рисунке). Температура изменялась с постоянной скоростью в широком интервале от 293 до 700 К. Видно, что кривые состоят из двух участков: генерации напряжений и их снижении после 600 К из-за распада твердого раствора  $\beta$ - фазы и деградации функциональных свойств сплава.

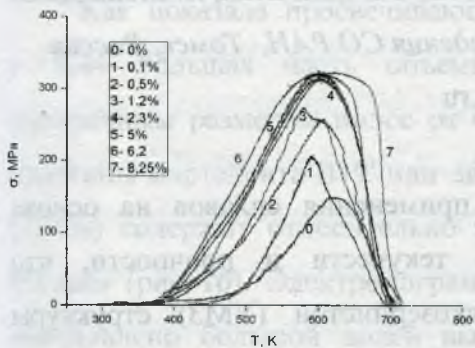


Рисунок 3. Кривые генерации реактивных напряжений в кристаллах сплава Cu-Al-Ni

Рисунок 4. Зависимость величины максимума напряжений  $\sigma_{max}$  на кривых на рис. 3 от величины напряжения сжатия  $\sigma_f$  при задании деформации ПФ

Обработка кривых на рисунке 3 показывает, что при деформациях больше 2 % наклон участков генерации реактивных напряжений равен 1.9 МПа/К, что соответствует обратному мартенситному переходу  $\beta'_1 \rightarrow \beta$ . При деформациях меньше 2 % экспериментальные точки располагаются как выше, так и ниже значения 1.9 МПа/К. Рисунок 4 демонстрирует, что при указанных деформациях напряжения, соответствующие максимуму кривых на рисунке 3, линейно зависят от величины напряжения сжатия. Ситуация при этих деформациях требует дальнейшего изучения.

1. В.И. Николаев, П.Н. Якушев, Г.А. Малыгин и др. Письма в ЖТФ 36 (19), 83 (2010).
2. В.И. Николаев, П.Н. Якушев, Г.А. Малыгин и др. Письма в ЖТФ 40 (3), 57 (2014).
3. В.И. Николаев, А.И. Аверкин, В.М. Егоров и др. ФТТ 56, 508 (2014).