

ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПАМЯТИ ФОРМЫ В МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВОВ Cu-Al-Ni

А.И. Аверкин^{1*}, П.Н. Якушев¹, Е.В. Трофимова⁴, Г.П. Зограф^{1,4}, Р.Б. Тимашов¹,
С.А. Пульнев¹, С.Б. Кустов^{2,5}, В.И. Николаев^{1,2,3}

¹ФТИ им А.Ф.Иоффе, РАН, Политехническая ул. 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия

²Университет ИТМО, Кронверкский просп., 49-А, Санкт-Петербург, 197101, Россия

³ООО «Совершенные кристаллы», Политехническая ул. 28, Санкт-Петербург, 194064, Россия

⁴СПбПУ, Политехническая ул. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

⁵Universitat de les Illes Balears Ctra de Valldemossa km. 7.5 E-07122, Palma de Mallorca, Spain

*e-mail: andreyaverkin@mail.ru

Аннотация. Исследован характер восстановления предварительной деформации при реализации эффекта памяти формы в монокристаллах сплава Cu-13.6 wt.% Al-4.0 wt.% Ni при обратном мартенситном превращении. Установлено, что скорость восстановления нелинейно зависит от предварительной деформации (ϵ_0) и может резко возрастать при её увеличении до величин близких к максимальным значениям (7-9 %).

1. Введение

Ранее нами было обнаружено, что восстановление деформации памяти формы (ПФ) в монокристаллах Cu-Al-Ni и Ni-Fe-Ga-Co при обратном мартенситном превращении может протекать по различным механизмам, диапазон скоростей при этом может отличаться до 8 порядков [1-3]. В [1] было показано, что скорость восстановления деформации при реализации эффекта памяти формы зависит от направления предварительной деформации и высказано предположение, что скорость восстановления зависит также от величины самой деформации.

Целью настоящей работы является исследование влияния величины предварительной деформации на кинетику ее восстановления в ходе обратного мартенситного превращения.

2. Материал и методика эксперимента

В работе использовался монокристалл в виде цилиндрического прутка диаметром 5 мм, выращенный из расплава с использованием метода Степанова [4]. Состав кристалла был близок к эвтектоидному Cu-13.6 wt.% Al-4.0 wt.% Ni, аналогичному исследованному ранее [2, 3]. Ось выращенного кристалла совпадала с направлением [100] в кубической фазе. Выращенные прутки были закалены от 1220 К в воду и затем отожжены в течении 1 h при температуре 373 К. Температуры прямого и обратного мартенситного превращения составили: $M_n = 310$ К, $M_k = 288$ К, $A_n = 308$ К, $A_k = 344$ К.

После указанной термообработки в образцах при охлаждении формировалась 18R мартенситная структура. Из выращенного и термообработанного кристалла нарезались цилиндрические образцы высотой $h_0 = 7$ mm, которые подвергались деформации сжатия вдоль оси $[100]_\beta$ со скоростью 10^{-4} s⁻¹ в испытательной машине Instron 1342 при

температуре 293 К. Для исследования возврата деформации при обратном мартенситном превращении использовалась установка с лазерным измерителем скорости деформации на основе интерферометра Майкельсона [5]. Данный метод позволяет добиться высокой точности измерения деформации в широком диапазоне значений скоростей деформации: от 10^{-7} с^{-1} до 10^4 с^{-1} . Для восстановления деформации образцы нагревались с со скоростью 2 К/min, при этом фиксировались изменения скорости деформации как функция времени и температуры. Подобные зависимости исследовались для образцов, деформированных до различных значений предварительной деформации.

3. Результаты эксперимента и обсуждение

На рисунке 1 приведена диаграмма сжатия образца сплава Cu-13.6 wt.% Al-4.0 wt.% Ni с ЭПФ до полной деформации памяти формы и начала последующего упругого участка. Особенностью данной диаграммы нагружения является длительный участок слабого разупрочнения, на фоне которого отмечаются спады (провалы) напряжения, включая резкие, при деформациях ПФ приближающихся к предельным (для данных образцов максимум $\varepsilon_s \sim 8,8 \%$). Такое поведение объясняется перестройкой структуры мартенсита под нагрузкой. Первый спад, при $\varepsilon_s \sim 3-6 \%$, вероятно, связан с раздвойникованием β_1' (18R) мартенсита, второй, при деформациях $\sim 8 \%$, наиболее резкий, соответствует процессу образования объемных (сравнимых с объемом образца) доменов γ_1' (2H) мартенсита [3, 6]. Учитывая эти особенности, на диаграмме можно выделить три области задания деформации: 1 - деформации до первого «провала» на диаграмме $\sigma - \varepsilon$, 2 – до зоны интенсивных скачков (сбросов) напряжения деформирования, 3 – зона скачков напряжения до максимальной деформации памяти формы и начала последующего упругого нагружения.

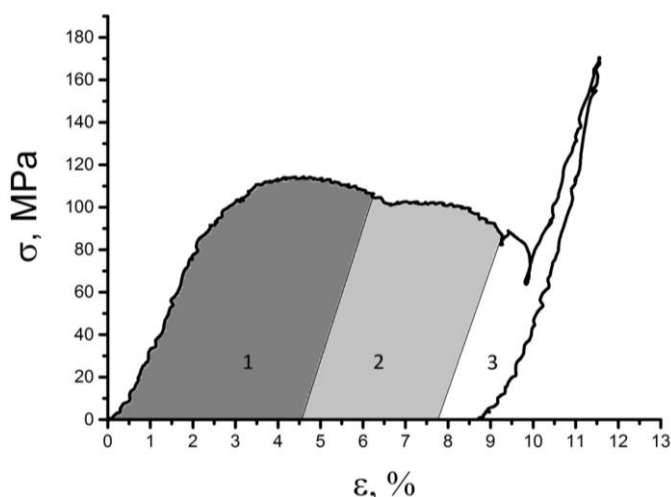


Рис. 1. Три области деформаций на диаграмме сжатия образцов сплава Cu-13.6 wt.% Al-4.0 wt.% Ni с ЭПФ.

Результаты измерения скорости восстановления деформации выявили, что для области 1 восстановление протекает в диапазоне температур от 312 К до 346 К и происходит плавно со скоростями, не превышающими $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. В области 2 процесс восстановления формы происходит в целом с небольшими скоростями, но появляются отдельные скачки деформации, т.е. кратковременное возрастание скорости восстановления ПФ. При этом вероятно, объемной доли метастабильной фазы γ_1' мартенсита ответственной за скачки деформации в кристалле еще недостаточно.

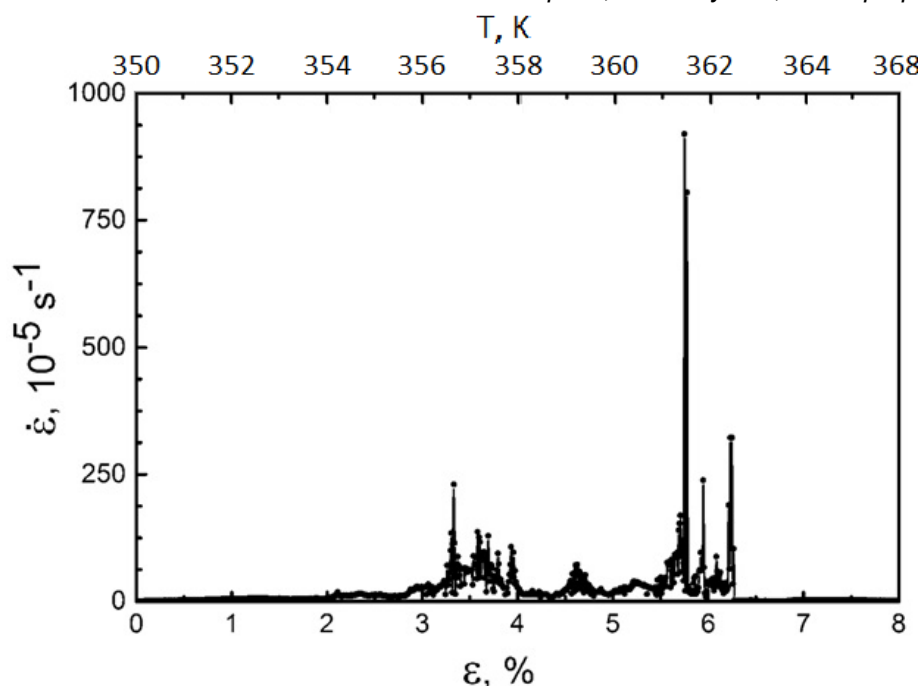


Рис. 2. Зависимость скорости восстановления деформации ПФ от величины возвращенной деформации ПФ и температуры для области 2, $\varepsilon_0 = 6.3\%$.

В области 3 большая часть деформации ПФ восстанавливается практически мгновенно (за время порядка десятых микросекунды) и лишь небольшая часть деформации ($\sim 0.65\%$) плавно, с небольшими скоростями. Наличие такого плавного участка свидетельствует о том, что даже при максимальных деформациях ПФ в образцах наряду с γ_1' фазой остается доля β_1' мартенсита. Важным фактором, влияющим на переход от плавного восстановления деформации ПФ к взрывному, является критический объем γ_1' фазы.

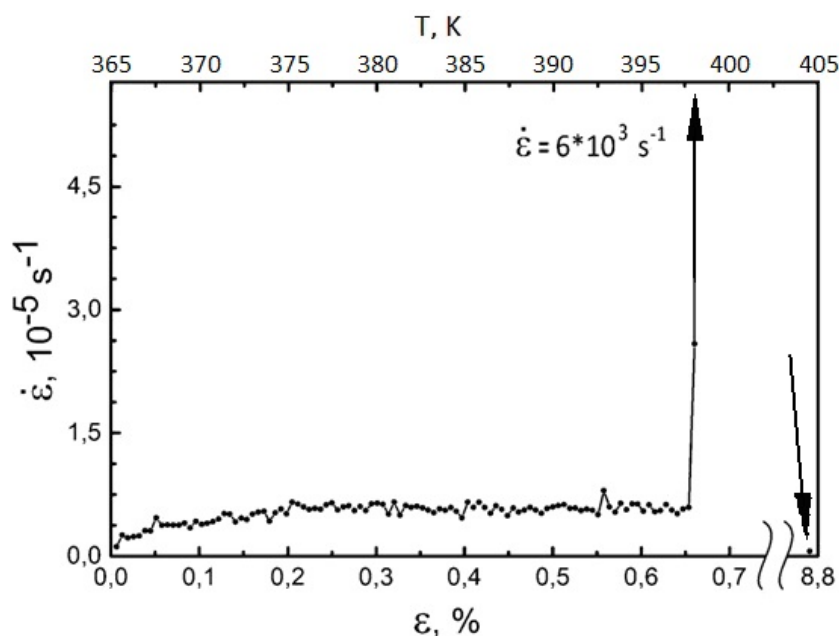


Рис. 3. Зависимость скорости восстановления деформации ПФ от величины возвращенной деформации ПФ и температуры для случая взведения, соответствующего области 3 на Рис. 1.

При задании образцу максимальной деформации памяти формы 8,8 %, совершается механическая работа W .

$$W = \int F(l) * dl = 0,185 \text{ J}, \quad (1)$$

где $F(l)$ - прикладываемое к образцу усилие, а l – перемещение.

Во время взрывоподобного восстановления деформации эта запасенная энергия полностью переходит в кинетическую энергию, которую приобретает образец [1]. При этом скорость отрыва образца от опоры составляет 23 m/s.

Критерием смены механизма восстановления деформации ПФ можно рассматривать случай полной разгрузки опоры, то есть подъем образца на высоту равную абсолютной деформации памяти формы и нахождение при этом в невесомости (Рис. 4). Энергия, необходимая в этом случае:

$$W' = mg\Delta l = 4.23 \text{ } \mu\text{J}, \quad (2)$$

где m - масса образца, g - ускорение свободного падения, Δl - абсолютная деформация образца.

Если предположить, что при взрывном восстановлении абсолютно весь объем образца занят γ_1' мартенситом, то объемная доля этой фазы необходимая для отрыва образца от опоры составляет лишь $2.3 \cdot 10^{-3}$ процента.

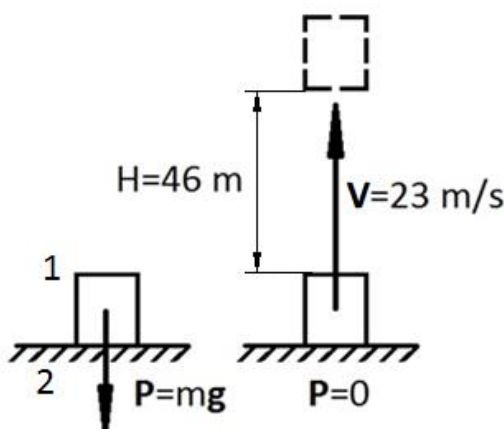


Рис. 4. Схема восстановления деформации образца (1) стоящего на основании-опоре (2): слева - плавное восстановление, справа - взрывоподобное.

4. Выводы

Установлено, что скорость восстановления деформации памяти формы меняется в зависимости от величины предварительной деформации нелинейно. При приближении к предельным значениям деформации скорость восстановления увеличивается на 8 порядков. Сделана нижняя оценка объемной доли метастабильной фазы необходимой для перехода к взрывоподобному восстановлению деформации.

Исследования были поддержаны Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант РФФИ № 13-08-01111) и программой развития Международных научных подразделений Университета ИТМО.

Литература

- [1] В.И. Николаев, П.Н. Якушев, Г.А. Малыгин, С.А. Пульнев // *Письма в Журнал технической физики* **36(19)** (2010) 83.

- [2] В.И. Николаев, П.Н. Якушев, Г.А. Малыгин, А.И. Аверкин, А.В. Чикиряка, С.А. Пульнев // *Письма в Журнал технической физики* **40(3)** (2014) 63.
- [3] В.И. Николаев, А.И. Аверкин, В.М. Егоров, Г.А. Малыгин, С.А. Пульнев // *Физика твердого тела* **56(3)** (2014) 508.
- [4] А.В. Степанов, *Получение изделий непосредственно из расплава* («Знание», М., 1966).
- [5] P.N. Yakushev // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)* **18(4)** (2009) 328.
- [6] C. Picornell, J. Pons, E. Cesari // *Materials Science and Engineering: A* **378** (2004) 222.

SHAPE MEMORY DEFORMATION RECOVERY FEATURES IN Cu-Al-Ni SINGLE CRYSTALS

A.I. Averkin^{1*}, P.N. Yakushev¹, E.V. Trofimova^{1,4}, G.P. Zograf^{1,4}, R.B. Timashov¹,
S.A. Pulnev¹, S.B. Kustov^{2,5}, V.I. Nikolaev^{1,2,3}

¹Ioffe Institute, RAS, Polytechnicheskaya st. 26, Saint-Petersburg, 194021, Russia

²ITMO University, Kronversky ave. 49-A, Saint-Petersburg, 197101, Russia

³Perfect crystals LLC, Polytechnicheskaya st. 28, Saint-Petersburg, 194064, Russia

⁴SPbPU, Polytechnicheskaya st. 29, Saint-Petersburg, 195251, Russia

⁵Universitat de les Illes Balears, Ctra de Valldemossa km. 7.5 E-07122, Palma de Mallorca, Spain

*e-mail: andreyaverkin@mail.ru

Abstract. Shape memory recovery strain at reverse martensitic transformation has been investigated in Cu-13.6 wt.% Al-4.0 wt.% Ni alloy single crystals. It is found that the rate of recovery depends on previous SM deformation nonlinearly and can drastically increase with increasing SM deformation up to values close to full shape memory deformation (~7-9 %).

Acknowledgements

This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR grant № 13-08-01111) and the International Programme for the Development of scientific departments of ITMO University.

References

- [1] V.I. Nikolaev, P.N. Yakushev, G.A. Malygin, S.A. Pulnev // *Technical Physics Letters* **36(19)** (2010) 914.
- [2] V.I. Nikolaev, P.N. Yakushev, G.A. Malygin, A.I. Averkin, A.V. Chikiryaka, S.A. Pulnev // *Technical Physics Letters* **40(2)** (2014) 123.
- [3] V.I. Nikolaev, A.I. Averkin, V.M. Egorov, G.A. Malygin, S.A. Pulnev // *Physics of the Solid State* **56(3)** (2014) 522.
- [4] A.V. Stepanov, *Poluchenie izdelii neposredstvenno iz rasplava* («Znanie», Moscow, 1966) (in Russian).
- [5] P.N. Yakushev // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)* **18(4)** (2009) 328.
- [6] C. Picornell, J. Pons, E. Cesari // *Materials Science and Engineering: A* **378** (2004) 222.