

05.4

## Влияние предварительной сжимающей нагрузки на работу, производимую монокристаллами Cu–Al–Ni при взрывном восстановлении деформации памяти формы

© Р.Б. Тимашов, П.Н. Якушев, С.А. Пульнев, В.И. Николаев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: timashov@inbox.ru

Поступило в Редакцию 23 августа 2021 г.

В окончательной редакции 27 октября 2021 г.

Принято к публикации 27 октября 2021 г.

Исследована способность мартенситных монокристаллов Cu (82.5 wt.%)–Al (13.5 wt.%)–Ni (4.0 wt.%) в процессе обратного мартенситного превращения совершать работу, ударом перемещая груз при восстановлении деформации памяти формы. Изучена зависимость этой работы от предварительной нагрузки. Установлено, что переход к ударному режиму происходит после предварительного сжатия кристалла до полной деформации памяти формы (~9%) при превышении нагрузки напряжения раздвойнивания мартенсита более чем вдвое. Данные дифференциальной сканирующей калориметрии показали, что после такого сжатия кристалла до 200–250 МПа и выше отмечается резкое сужение температурного интервала обратного мартенситного превращения.

**Ключевые слова:** мартенситное превращение, монокристалл, высокоскоростное восстановление деформации памяти формы.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.03.51983.19004

Способность кристаллов с эффектом памяти формы (ЭПФ) к высокоскоростному (взрывному) восстановлению деформации при обратном мартенситном превращении (ОМП) обнаружена ранее в ряде монокристаллов различных сплавов [1–4]. Однако до сих пор не оценивалась работа, производимая при этом кристаллами. В данном исследовании нами показана способность кристаллов перемещать груз, установленный сверху, с высокой энергией. Масса груза и величины перемещения могут быть существенно больше, чем масса кристалла и его геометрические размеры. Последнее представляется перспективным для конструкций быстродействующих механических приводов [5], особенно в том случае, когда применение классических приводов (электрических, пневматических и др.) имеет ограничения, например размерные. В случае кристаллов с ЭПФ размер привода может быть немного больше самого кристалла.

Цель данного исследования состоит в определении условий предварительного нагружения кристалла с ЭПФ при деформировании, в которых при возврате деформации в процессе ОМП происходит переход от движения груза вместе с образцом к его свободному перемещению. Ранее в [6] нами исследовался ряд технологических параметров для кристаллов Cu–Al–Ni, играющих решающую роль в достижении наибольших энергий движения при ОМП. Было установлено, что крайне существенны условия предварительной термообработки.

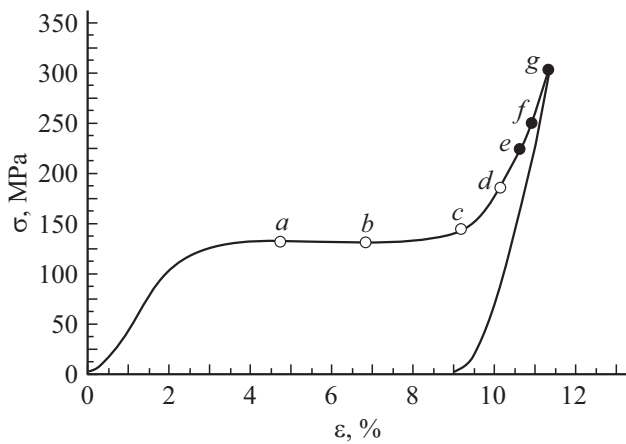
В настоящей работе использовались монокристаллы сплава Cu (82.5 wt.%)–Al (13.5 wt.%)–Ni (4.0 wt.%). Этот сплав достаточно подробно исследован в плане мартенситных превращений [7–9]. Кристаллы были вы-

ращены из расплава в форме стержней диаметром 5 mm. Высота вырезанных образцов составляла 10 mm. Кристаллы перед использованием выдерживались 15 min при температуре 1243 K и закачивались в воду комнатной температуры. Подготовленные таким способом образцы деформировались в испытательной машине Instron 1342 при комнатной температуре одноосным сжатием по оси роста кристалла [100], вплоть до полной деформации памяти формы (~9%), в том числе и так, чтобы нагрузка выводила диаграмму  $\sigma$ – $\epsilon$  на второй линейный (упругий) участок. Для возврата деформации кристаллы помещались в испытательный стенд, в котором на них устанавливались грузы 6.57 или 0.29 N и производился нагрев кристаллов со скоростью 45 K/min до температуры обратного мартенситного превращения, т.е. до перехода в состояния аустенита.

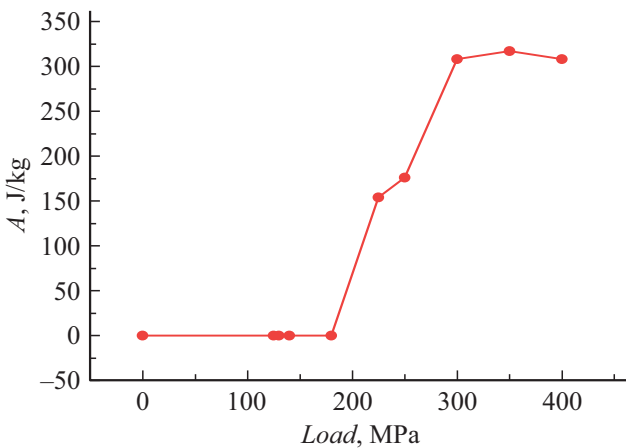
На рис. 1 представлена диаграмма предварительного сжатия кристалла, литерами отмечены остановки и снятие напряжения в области полной и неполной деформации памяти формы (ДПФ), которые осуществлялись для проверки режимов возврата деформации и характера движения груза при нагреве кристалла.

На каждой остановке вдоль кривой нагружения производился возврат деформации. Перемещение груза отдельно от образца (скачком) наблюдалось только тогда, когда нагрузка по диаграмме  $\sigma$ – $\epsilon$  превышала 175 МПа, что соответствовало полной деформации памяти формы (т.е. завершению раздвойнивания мартенсита) и началу второго линейного участка на диаграмме  $\sigma$ – $\epsilon$ .

В результате была получена зависимость удельной работы ( $A$ ), совершаемой кристаллом при возврате



**Рис. 1.** Диаграмма одноосного сжатия монокристалла сплава Cu (82.5 wt.%)–Al (13.5 wt.%)–Ni (4.0 wt.%) до полной ДПФ и фиксированной нагрузки 300 МПа. Литерами отмечены остановки нагружения для последующего возврата деформации. Литеры *e–g* соответствуют значениям нагрузок предварительной деформации, при которых работа при возврате деформации совершалась с отрывом груза от образца и его свободным полетом, литеры *a–d* — значениям нагрузок, обеспечивающих плавное движение кристалла вместе с грузом на величину деформации кристалла.



**Рис. 2.** Зависимость удельной работы, совершаемой кристаллом при мартенситном превращении, от максимальной предварительной нагрузки на образец при его деформировании сжатием ( $\sigma_{\max}$ ).

ДПФ, от нагрузки в предварительном сжатии кристалла (рис. 2). Зависимость имеет пороговый характер с последующим насыщением.

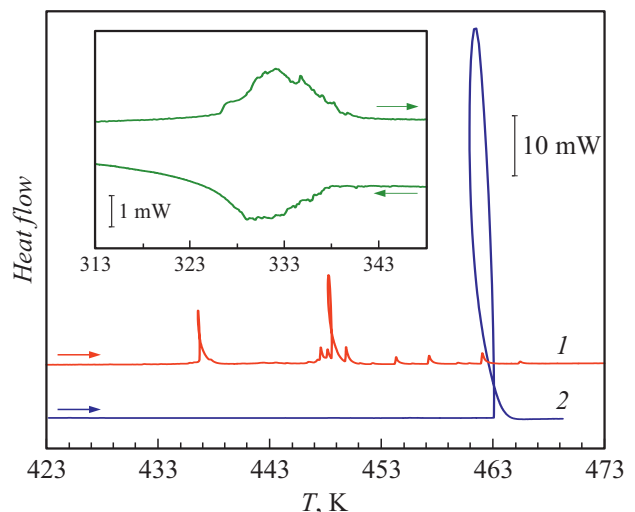
Для достижения максимального значения работы оказалось достаточно предварительно сжать кристалл до  $\sigma > 250–300$  МПа. При дальнейшем увеличении напряжения  $A(\sigma)$  достигает насыщения (рис. 2). Отметим, что указанные значения приблизительно вдвое превышают напряжение, необходимое для раздвоения мартенсита.

Кроме высокоскоростного возврата ДПФ исследовались тепловые эффекты со взрывной кинетикой [10,11]. Были получены кривые дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) кристаллов с различной предварительной нагрузкой в процессе восстановления ДПФ. Эксперименты проводились в калориметре DSC6300 (Seiko Instruments). Как видно из рис. 3, нагружение кристалла приводит как к росту температуры превращения (при всех деформациях), так и к сужению температурного интервала ОМП. Последнее наблюдается лишь по достижении критических нагрузок  $\sim 250$  МПа, т.е. тогда же, когда имеет место переход к взрывному восстановлению деформации.

По оценке из работы [12] температурный интервал перехода в этом случае может быть равным  $10^{-4}–10^{-3}$  К.

Установленные закономерности отражают неравновесный характер ОМП, переход из метастабильного состояния сопровождается формированием коллективных мод деформации превращения. При этом наблюдается естественная корреляция напряжения предварительного сжатия и температурного интервала превращения, что определяет „пороговый“ характер импульсного высвобождения энергии деформирования во всем объеме. По-видимому, наблюдаемый нами эффект носит характер автосолитонной моды [13,14].

Для проверки воспроизводимости результатов проведено несколько серий испытаний с каждым из приготовленных образцов. В результате показано, что кристалл при повторных деформированиях и нагревах до температур ОМП в состоянии достаточно стабильно преобразовывать энергию, затраченную на его деформацию, в работу перемещения груза с предсказуемой



**Рис. 3.** ДСК-кривые при нагреве со скоростью 2 К/мин деформированного кристалла Cu (82.5 wt.%)–Al (13.5 wt.%)–Ni (4.0 wt.%). 1 — для образца, нагруженного до 188 МПа, 2 — для образца, нагруженного до 250 МПа. На вставке показана ДСК-кривая для исходного кристалла без нагрузки сразу после закалки при нагреве и охлаждении.

кинетикой движения груза. Работа перемещения груза изменялась в пределах 20–30% от максимальной. Можно лишь отметить тенденцию к смещению температуры восстановления ДПФ в сторону больших температур (до 20 К) в серии последовательных испытаний. Последнее объясняется невысокой термостабильностью изучаемых сплавов при температурах около 470 К и выше. Длительная экспозиция приводит к их старению, постепенному распаду твердого раствора сплава кристалла, что сдвигает характеристические температуры к более высоким значениям. Однако при этом кристалл, возвращая энергию, затраченную на его деформацию, продолжает надежно „работать“, практически так же, как и в первом эксперименте, толчком перемещая груз.

Таким образом, исследованы возможности кристалла с ЭПФ совершать при восстановлении ДПФ работу, перемещать груз путем передачи ему импульса движения. Установлено, что величина работы зависит от величины нагрузки, которая прикладывалась к кристаллу при его предварительном деформировании. Зависимость имеет пороговый характер и насыщается при больших нагрузках. Характер зависимости коррелирует с данными калориметрии: на ДСК-кривых при той же пороговой нагрузке отмечается сильная локализация ОМП по температуре и времени протекания. Показан воспроизводимый характер работы кристалла при его циклическом функционировании в циклах ДПФ и ее восстановления. Результаты открывают перспективы для разработки ударных микроприводов.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] В.И. Николаев, П.Н. Якушев, Г.А. Малыгин, С.А. Пульнев, Письма в ЖТФ, **36** (19), 83 (2010). [V.I. Nikolaev, P.N. Yakushev, G.A. Malygin, S.A. Pul'nev, Tech. Phys. Lett., **36** (10), 914 (2010). DOI: 10.1134/S1063785010100123].
- [2] В.И. Николаев, П.Н. Якушев, Г.А. Малыгин, А.И. Аверкин, А.В. Чикиряка, С.А. Пульнев, Письма в ЖТФ, **40** (3), 57 (2014). [V.I. Nikolaev, P.N. Yakushev, G.A. Malygin, A.I. Averkin, A.V. Chikiryaka, S.A. Pulnev, Tech. Phys. Lett., **40** (2), 123 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014020126].
- [3] А.И. Аверкин, П.Н. Якушев, Е.В. Трофимова, Г.П. Зограф, Р.Б. Тимашов, С.А. Пульнев, С.Б. Кустов, В.И. Николаев, Физика и механика материалов, **22** (1), 64 (2015).
- [4] S. Yang, T. Omori, C. Wang, Y. Liu, M. Nagasako, J. Ruan, R. Kainuma, K. Ishida, X. Liu, Sci. Rep., **6**, 21754 (2016). DOI: 10.1038/srep21754
- [5] X. Huang, K. Kumar, M.K. Jawed, A.M. Nasab, Z. Ye, W. Shan, C. Majidi, Adv. Mater. Technol., **4** (4), 1800540 (2019). DOI: 10.1002/admt.201800540
- [6] V.I. Nikolaev, R.B. Timashov, S.A. Pulnev, L.I. Guzilova, P.N. Butenko, S.I. Stepanov, Mater. Phys. Mech., **47** (1), 59 (2021). DOI: 10.18149/MPM.4712021\_6
- [7] C. Picornell, J. Pons, E. Cesari, Acta Mater., **49** (20), 4221 (2001). DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00308-1
- [8] E. Cingolani, M. Ahlers, J. Van Humbeeck, Met. Mater. Trans. A, **30** (3), 493 (1999). DOI: 10.1007/s11661-999-0041-9
- [9] L.A. Matlakhova, E.C. Pereira, S.A. Pulnev, C.Y. Shigue, N.A. Pali, Metals, **10** (2), 219 (2020). DOI: 10.3390/met10020219
- [10] C. Picornell, J. Pons, A. Paulsen, J. Frenzel, V. Kaminskii, K. Sapozhnikov, J. Van Humbeeck, S. Kustov, Scripta Mater., **180**, 23 (2020). DOI: 10.1016/j.scriptamat.2020.01.018
- [11] E.S. Machlin, M. Cohen, Trans. AIME, **191**, 746 (1951).
- [12] A.R. Entwistle, Met. Trans., **2**, 2395 (1971). DOI: 10.1007/BF02814877
- [13] O.B. Naimark, L.V. Filimonova, V.A. Barannikov, V.F. Leotnt'ev, S.V. Uvarov, Phys. Mesomech., **4** (5) 13 (2001).
- [14] Б.С. Кернер, В.В. Осипов, УФН, **157** (2), 201 (1989). DOI: 10.3367/UFNr.0157.198902a.0201 [B.S. Kerner, V.V. Osipov, Sov. Phys. Usp., **32** (2), 101 (1989). DOI: 10.1070/PU1989v032n02ABEH002679].