

05

Эффект локализации деформации в монокристаллах Cu–Al–Ni при изгибе продольной силой

© С.А. Пульнев, А.И. Прядко, А.В. Чикиряка[¶], В.И. Николаев

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

[¶] E-mail: chikiryaka@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 июня 2018 г.

Исследовано поведение сверхупругого монокристалла из сплава Cu–14.2%Al–4%Ni в случае больших обратимых деформаций при изгибе продольной силой. Обнаружен и изучен эффект локализации деформации по длине кристалла. Показано, что наибольшие обратимые деформации (до 10%) сосредоточены в центральной части изгибаемого кристалла.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.21.46860.17425

На использовании материалов с эффектом памяти формы основан широкий спектр различных устройств, таких как двигатели и приводы для автомобильной промышленности, авиационной и космической техники [1–5]. Технические приложения базируются на способности материалов с эффектами памяти формы и сверхупругости преобразовывать подводимую тепловую энергию в механическую работу за счет изменения формы при термоупругих мартенситных превращениях [6–9]. С целью изменения формы элементы из материала с эффектом памяти формы могут подвергаться деформациям различного типа: кручения, растяжения, сжатия или изгиба. При растяжении и сжатии деформации распределяются равномерно как в сечении, так и по длине элемента. Для элемента, подвергающегося изгибу продольной силой, деформация распределяется неравномерно по сечению. Вопрос же о распределении деформации по длине элемента при достижении больших деформаций, превышающий упругие, остается открытым и является предметом данного исследования.

В качестве экспериментального материала был выбран сплав Cu–14.2%Al–4%Ni, монокристаллы которого обладают уникальными

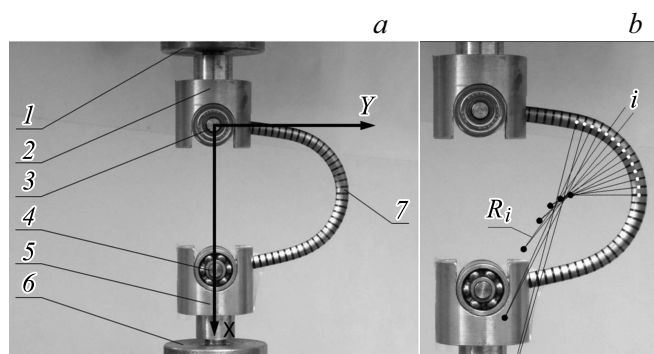


Рис. 1. Изогнутый сверхупругий монокристаллический элемент в испытательной машине. *a* — схема эксперимента: 1 — неподвижная опора испытательной машины, 2 — неподвижный захват, 3 и 4 — подшипниковые шарнирные опоры, 5 — подвижный захват, 6 — подвижный шток испытательной машины, 7 — сверхупругий элемент; *b* — схема определения локальной деформации *i*-го участка элемента.

свойствами — большими неупругими и обратимыми деформациями, достигающими 17% [10,11]. Монокристаллы данного сплава в форме прутков диаметром 5 mm были выращены методом Степанова с кристаллографическим направлением $\langle 100 \rangle$ вдоль оси прутка. Образцы после закалки от температуры 1230 K в воду и отжига при 373 K в течение часа имели следующие температуры мартенситных превращений: $M_s = 233$ K, $M_f = 230$ K, $A_s = 265$ K, $A_f = 274$ K. Из них были изготовлены сверхупругие элементы, в которых под действием напряжения реализуется превращение аустенитной β_1 -фазы в β'_1 -мартенситную фазу [10].

Для исследования формы изогнутого элемента осуществлялось его нагружение продольной силой на испытательной машине Instron-1341 при комнатной температуре, как показано на рис. 1, *a*. Сверхупругий элемент диаметром 5 mm и длиной 125 mm был установлен в подшипниковые шарнирные опоры, которые закреплялись в захватах испытательной машины. Для нахождения распределения деформации по длине образца на его поверхность было нанесено 50 рисок, перпендикулярных его оси, с шагом 2.5 mm. В процессе нагружения про-

водилась фотофиксация формы образца. По полученному изображению были определены координаты центров рисок $[X_i, Y_i]$, которые задают положение нейтральной оси элемента и показаны светлыми точками на рис. 1, *b*.

Методика определения локальной деформации по длине монокристалла базируется на гипотезе плоских сечений классической теории изгиба Бернулли–Эйлера [12]. Данная теория основана на следующих положениях:

- перемещения и деформации предполагаются малыми;
- материал рассматривается как линейно-упругий, описываемый законом Гука $\sigma = E\varepsilon$, где σ — напряжение, ε — деформация, E — модуль Юнга;
- размеры поперечного сечения стержня предполагаются малыми по сравнению с радиусом кривизны оси изогнутого стержня;
- поперечные сечения стержня, плоские и перпендикулярные его оси до деформации, остаются такими же плоскими и перпендикулярными оси изогнутого стержня после деформации.

Исследование изгиба сверхупругого элемента при больших перемещениях и деформациях выходит за рамки классической теории изгиба, так как перемещения (прогибы) и деформации не являются малыми, а материал с эффектом сверхупругости демонстрирует ярко выраженное нелинейное поведение. При достижении напряжений 180–200 МПа происходит интенсивная деформация образца за счет образования под действием напряжения β'_1 -мартенситной фазы, на диаграмме деформирования σ – ε образуется плато, протяженность которого достигает 8–10% [11].

В ходе анализа полученных изображений изогнутого элемента было установлено, что риски, нанесенные на изгибный элемент, сохраняют прямолинейность и перпендикулярность оси по всей его длине для всего диапазона перемещений штока испытательной машины. Таким образом, гипотеза плоских сечений классической теории изгиба Бернулли–Эйлера подтверждается и для случая экспериментально достигнутых больших прогибов и деформаций при изгибе сверхупругого материала, который обладает нелинейным характером зависимости напряжения от деформации $\sigma = f(\varepsilon)$. Полученный результат позволил разработать методику количественного определения локальной деформации и ее распределения по длине элемента.

Методику определения деформации по длине изгибного элемента иллюстрирует рис. 1, *b*, на котором темными точками показаны пересечения продолжения соседних рисок, ограничивающих каждый *i*-й участок элемента. Расстояние от точки пересечения рисок до нейтральной оси элемента и есть радиус кривизны *i*-го участка, а локальная деформация ε_i вычисляется по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{d}{2R_i}, \quad (1)$$

где *d* — диаметр изгибного элемента, R_i — радиус кривизны *i*-го участка изгибного элемента.

Результаты обработки изображения изогнутого элемента (*a*) и распределение деформации по его длине (*b*) при перемещении штока испытательной машины 40 mm приведены на рис. 2.

Для перемещения штока испытательной машины 40 mm максимальный прогиб в центре элемента составляет 43 mm (рис. 2, *a*). Эти значения сравнимы с длиной элемента, равной 125 mm, и составляют 32 и 34% от нее соответственно. Таким образом, данные величины, характеризующие изгиб элемента, значительно выходят за рамки допущений классической теории изгиба.

Локальная деформация наружного волокна распределена по длине элемента неравномерно, она достигает максимума в центре и спадает до нулевого значения на его концах (рис. 2, *b*). Эта зависимость имеет симметричный относительно центра элемента колоколообразный вид с резким падением от максимального значения 10.5% до 1%, перегибом кривой и дальнейшим плавным, близким к линейному падением деформации до нуля. Такой характер зависимости связан с изменением механизма деформирования материала от упругого линейного к нелинейному „сверхупругому“, обусловленному интенсивным превращением аустенитной β_1 -фазы в β'_1 -мартенситную фазу. При этом возрастание деформации от 1 до 10.5% локализовано на половине длины элемента симметрично относительно центра.

Таким образом, проведено исследование поведения сверхупругого монокристалла из сплава Cu–14.2% Al–4% Ni при больших деформациях, превышающих на один-два порядка упругие, характерные для традиционных металлических материалов. Обнаружен эффект локализации деформации по длине монокристалла, заключающийся в том, что ее

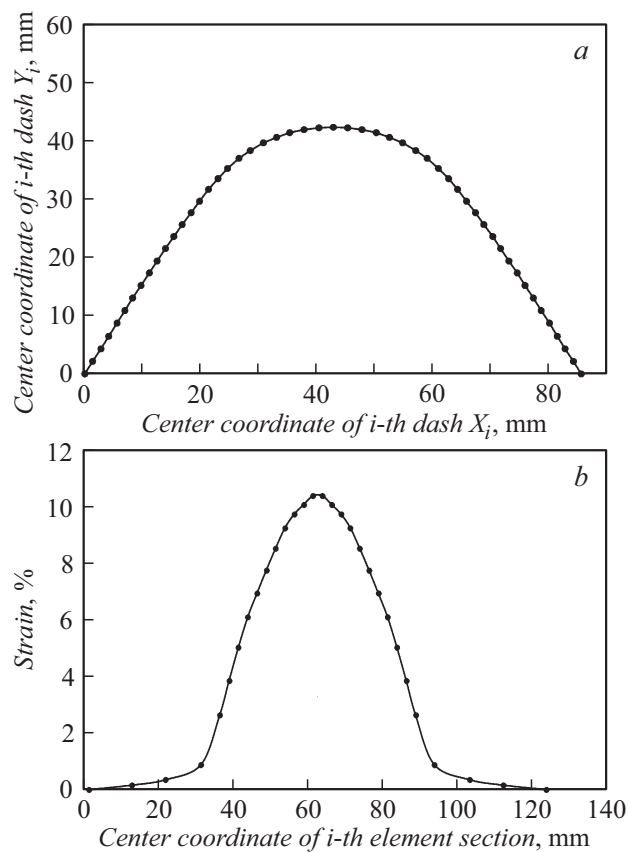


Рис. 2. Координаты центров рисок $[X_i, Y_i]$ (a) и распределение деформации (b) по длине изгибаемого элемента для хода штока 40 mm.

изменение от 1 до 10% сосредоточено в центральной части элемента на половине его длины.

В заключение следует отметить, что обнаруженный эффект локализации деформации имеет важное значение при разработке двигателей и приводов, основанных на использовании материалов, обладающих эффектами памяти формы и сверхупругости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 16-19-00129).

Список литературы

- [1] *Pulnev S., Nikolaev V., Priadko A., Rogov A., Viahhi I.* // J. Mater. Eng. Perform. 2010. V. 20. N 4-5. P. 497–499.
- [2] *Priadko A., Nikolaev V., Pulnev S., Stepanov S., Rogov A., Chikiryaka A., Shmako O.* // Mater. Phys. Mech. 2017. V. 32. N 1. P. 83–87.
- [3] *Jani J., Leary M., Subic A.* // J. Intelligent Mater. Syst. Struct. 2017. V. 28. N 13. P. 1699–1718.
- [4] *Jani J., Leary M., Subic A., Gibson M.* // Mater. Design. 2014. V. 56. P. 1078–1113.
- [5] *Nespoli A., Besseghini S., Pittaccio S., Villa E., Viscuso S.* // Sensors Actuators A. 2010. V. 158. P. 149–160.
- [6] *Пульнев С.А., Прядко А.И., Ястребов С.Г., Николаев В.И.* // ЖТФ. 2018. Т. 88. В. 6. С. 843–849.
- [7] *Малыгин Г.А., Николаев В.И., Пульнев С.А., Чикиряка А.В.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 24. С. 39–45.
- [8] *Пульнев С.А., Николаев В.И., Малыгин Г.А., Кузьмин С.Л., Шпейзман В.В., Никаноров С.П.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 8. С. 42–45.
- [9] *Николаев В.И., Пульнев С.А., Малыгин Г.А., Шпейзман В.В., Никаноров С.П.* // ФГТ. 2008. Т. 50. В. 11. С. 2079–2083.
- [10] *Horikawa H., Ichinose S., Moorii K., Miyazaki S., Otsuka K.* // Met. Transact. A. 1988. V. 19. N 4. P. 915–923.
- [11] *Otsuka K., Sakamoto H., Shimizu K.* // Acta Met. 1979. V. 27. P. 585–601.
- [12] *Весницкий А.И.* Волны в системах с движущимися границами и нагрузками. М.: Наука, Физматлит, 2001. 320 с.