

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В МОНОКРИСТАЛЛЕ CuAlNi

<sup>1,2</sup>Рубаник В.В., <sup>3</sup>Пульнев С.А., <sup>3</sup>Николаев В.И., <sup>1,2</sup>Рубаник В.В. мл., <sup>1</sup>Лесота А.В.

<sup>1</sup>ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»

г. Витебск, Беларусь, E-mail: ita@vitebsk.by

<sup>2</sup>УО «Витебский государственный технологический университет»

г. Витебск, Беларусь

<sup>3</sup>ФТИ им А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Исследования по ультразвуковому воздействию на поведение сплавов с памятью формы представляют особый интерес, поскольку реализация эффекта памяти формы осуществляется как за счет ультразвукового нагрева, так и механических напряжений, причем оба эти фактора действуют одновременно [1]. Особенность воздействия ультразвуковых колебаний (УЗК) на материалы обладающие памятью формы обусловлена тем, что основными элементарными носителями неупругой деформации являются не дислокации, а собственно термоупругое мартенситное превращение, сопровождающееся изменением формы превращенной области, или подвижные междоменные границы в мартенситной структуре, движение которых сопровождается изменением кристаллографической ориентации заметаемой при их движении области кристалла [2]. Анализ работ по данной тематике показывает, что механизм ультразвукового воздействия на материалы с термоупругими фазовыми переходами имеет довольно сложную природу, которая в деталях остаётся неясной, и требует проведения дополнительных исследований. В связи с тем, что ультразвуковое воздействие, в основном, исследовали для сплавов TiNi, в данной работе приведены результаты по влиянию УЗК на термоупругие превращения в монокристалле CuAlNi.

Для исследований использовали стержневой образец CuAlNi диаметром 6 мм и длиной 260 мм, выращенный в ФТИ им А.Ф. Иоффе РАН. Характеристические температуры, определенные методами дифференциальной сканирующей калориметрии, составили:  $M_s=104^{\circ}\text{C}$ ,  $M_f=74^{\circ}\text{C}$ ,  $A_s=93^{\circ}\text{C}$ ,  $A_f=120^{\circ}\text{C}$ . Динамику нагрева образцов в процессе ультразвукового воздействия наблюдали при помощи тепловизионной камеры NEC TN9100 с точностью  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Для максимального преобразования энергии УЗК в тепло образец должен работать в резонансном режиме, который характеризуется синусоидальным распределением акустических параметров по длине. При этом максимальный нагрев наблюдается в узлах смещения колебаний, а минимальный в узлах напряжений. Таким образом, в результате поглощения энергии наблюдается неравномерный нагрев образца по длине (рис.1).

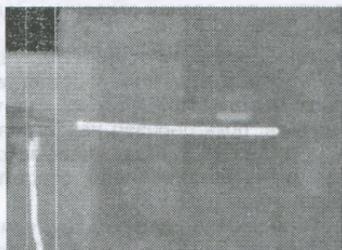


Рисунок 1 – Распределение температуры в монокристалле CuAlNi под действием УЗК

Предварительно образец деформировали изгибом на разную величину, которую определяли в соответствии с рис.2 [3].

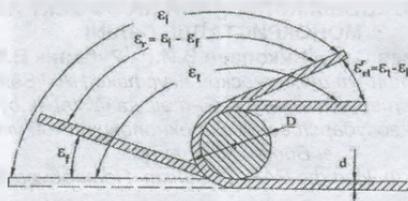


Рисунок 2 – Определение деформации при восстановлении формы:  $\epsilon_t$  – полная наводимая деформация,  $\epsilon_r$  – обратимая деформация,  $\epsilon_n$  – наведенная деформация,  $\epsilon_{ост}$  – остаточная деформация,  $\epsilon_{от}$  – упругая отдача

Полную наводимую деформацию определяли по формуле 1:

$$\epsilon_r = \frac{d_{оп}}{D_{опг}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Анализ результатов тепловизионных исследований показал, что сразу после включения ультразвука наблюдается увеличение температуры до значения  $A_n$ , после этого скорость изменения температуры падает (рис.3).

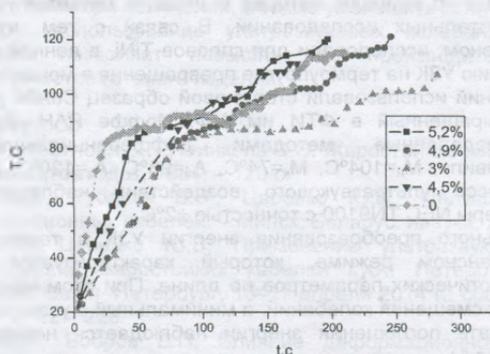


Рисунок 3 – Зависимость максимальной температуры монокристалла CuAlNi от времени ультразвукового воздействия при разной степени наведенной деформации

Это обусловлено изменением внутреннего трения в материале при переходе из мартенсита в аустенит [4], сопровождаемом, естественно, и изменением диссипируемой энергии ультразвука. При этом увеличение температуры осуществляется в два этапа: сначала, пока образец находится в мартенситной фазе, она резко возрастает до  $A_n$ , а затем, когда начинается обратное фазовое превращение, скорость нагрева уменьшается, о чем свидетельствует уменьшение наклона кривой зависимости температуры от времени.

Исследование динамики восстановления деформации при нагреве УЗК показало, что формовосстановление проходит не линейно (рис.4). Скорость реализации ЭПФ вблизи температур фазовых переходов значительно ниже, чем в середине температурного интервала ( $A_n - A_k$ ). Данное уменьшение скорости формовосстановления вблизи температур ( $A_n, A_k$ ) можно объяснить процессами раздвойнивания мартенсита и возвратного движения дислокаций, обусловленными последствиями ультразвукового воздействия [5]. Особенности увеличения скорости реализации ЭПФ в середине температурного интервала ( $A_n - A_k$ ) свидетельствуют о

том, что возврат деформации в данном случае осуществляется непосредственно в процессе реализации перехода мартенсит → аустенит.

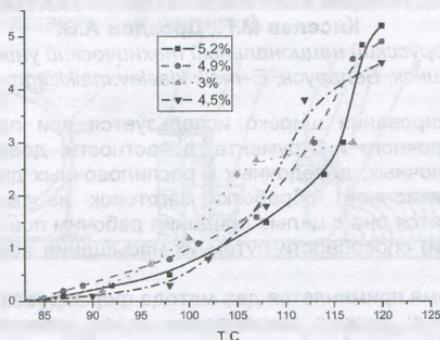


Рисунок 4 – Зависимость обратимой деформации от температуры

Таким образом, в сплаве CuAlNi на первом этапе ультразвукового воздействия наблюдается увеличение температуры до значения  $A_s$ , после чего она изменяется незначительно вплоть до момента выключения ультразвука, это обусловлено тем, что в аустенитном состоянии внутреннее трение значительно ниже, чем в двухфазном и мартенситном.

Исследование процесса изменения обратимой деформации при УЗК воздействии показало, что скорость реализации ЭПФ вблизи температур  $A_s$  и  $A_c$  значительно ниже, чем в середине температурного диапазона ( $A_m-A_c$ ).

**Список литературы:**

1. Тяпунина, Н.А. Действие ультразвука на кристаллы с дефектами / Н.А. Тяпунина, Е.К. Наими, Г.М. Зиненкова. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 238 с.
2. Беляев, С.П. Экспериментальное и компьютерное моделирование действия ультразвука на сплав Ti-Ni с памятью формы / С.П. Беляев, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл. // Перспективные материалы и технологии: монография. В 2т. Т1/ Под ред. В.В.Клубовича – Витебск: УО «ВГТУ», 2015. – С. 90 –114.
3. Prokoshkin, S. Shape memory alloys: fundamentals, modeling and applications / S. Prokoshkin [et al.]. – Montreal: ETS Publ., 2003. – 141 p.
4. Kustov, S. Damping properties of SMA / S. Kustov, J. Humbeek // Materials Science Forum, 2008. – Vol. 583. – PP. 85–109.
5. Милюкина, С.Н. Способы обработки и модель процесса низкотемпературного задания памяти формы сплавам TiNi / С.Н. Милюкина, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.) // Вестник ПГУ, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 12. – С.61–65.