

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ И УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ В СПЛАВАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В ПРОЦЕССЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

¹Столяров В.В., ¹Мисоченко А.А., ¹Угурчиев У.Х., ²Царенко Ю.В., ²Рубаник В.В.

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия, vlstol@mail.ru

²Институт технической акустики, Витебск, Беларусь

Для производства полуфабрикатов из сплавов с памятью формы используется термомеханическая обработка, включающая холодное волочение. При этом существует проблема одновременного повышения деформируемости и функциональных свойств сплава, поскольку первое достигается за счет высоких температур обработки, что в свою очередь приводит к ухудшению второго. Одним из подходов к решению данной проблемы является применение внешних энергетических воздействий, не сопровождаемых воздействием высоких температур. В сплавах с термоупругим мартенситным превращением деформационно-термические методы обработки в сочетании с импульсным током [1] или ультразвуковым воздействием [2] действительно позволяют существенно повысить технологические и эксплуатационные свойства, однако механизм такого воздействия недостаточно изучен. Особый интерес представляет совместное действие обоих эффектов. Для чистой меди было показано, что комбинация электропластического (ЭПЭ) и акустопластического (АПЭ) эффектов, может оказывать заметное влияние на дислокационную подвижность и деформационное поведение материала [3]. Цель настоящей работы – сравнительное исследование механического поведения при растяжении и волочении сплавов, проявляющих эффект памяти формы (ЭПФ), в условиях электроимпульсного и/или ультразвукового воздействия.

Объект исследования – проволока из сплавов Ti49.3Ni50,7 и Ti49.6Ni50.4. При растяжении импульсный ток и ультразвуковые колебания в различной последовательности вводили в образец на разных стадиях деформации и фиксировали величину ЭПЭ или АПЭ эффекта. Растяжение проводили при 20 и 200°C, температуру изменяли посредством калорифера.

Эксперимент вели по двум маршрутам: а) образцы в виде проволоки \varnothing 1,38 мм из Ti49.6Ni50.4 были подвергнуты волочению с УЗО и без УЗО до деформации 24% (частота УЗО - 18 кГц, амплитуда смещений 15 мкм, скорость волочения 50 мм/с) и подвергнуты растяжению с одиночными импульсами тока (плотность тока $j=500$ А/мм², длительность импульса $t=100$ мкс, интервал между импульсами ~ 10 с) с целью зафиксировать различия в деформационном поведении; б) образцы в виде проволоки \varnothing 4 мм из сплава Ti49.3Ni50,7 были прокатаны с током (плотность тока $j=100$ А/мм², длительность $t=100$ мкс, скважность 10) до деформации $e=1,2$ и подвергнуты волочению с УЗО (частота 18 кГц, амплитуда смещения 25 мкм) с целью зафиксировать повышение деформационной способности.

Результаты растяжения образцов типа «а» представлены на рис.1. Наличие импульсов тока приводит к скачкам напряжения вниз с амплитудой 65-70 МПа и не зависит от предварительной УЗО. Видно, что предварительное волочение с УЗО не оказывает влияния на напряжение до разрушения заготовок (1600 МПа), однако повышает относительное удлинение: при растяжении с током без предварительной УЗО относительное удлинение составляет около 6% (рис. 1а); с предварительной УЗО – 8% (рис. 1б).

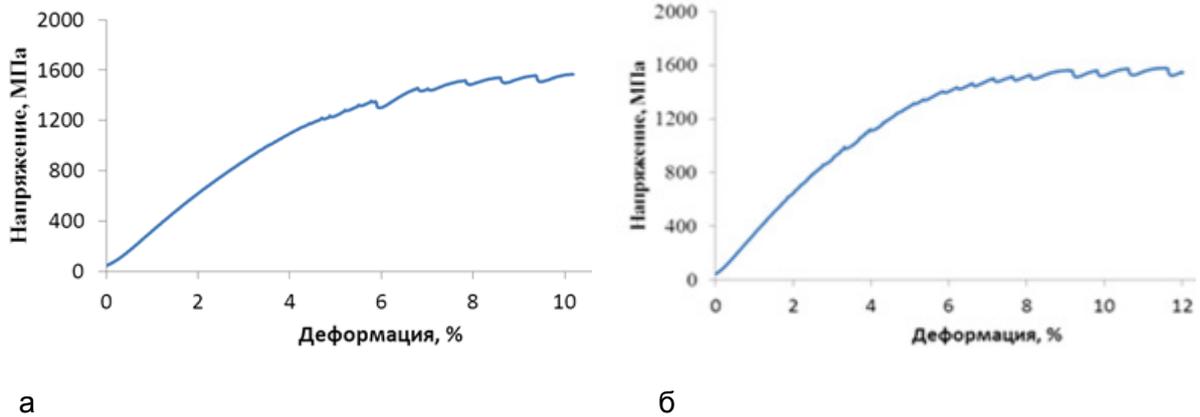


Рисунок 1 - Кривые «напряжение-деформация» при растяжении с одиночными импульсами тока сплава Ti-50,4ат.%Ni: а) после волочения; б) после УЗО + волочение.

Образцы «б» показали отсутствие деформируемости при волочении с УЗО образцов, предварительно прокатанных с током до $\epsilon=1,2$, они разрушались уже на первых этапах волочения. В этой связи для снижения механических напряжений была выполнена УЗО без волочения. Амплитуда напряжений составляла 100 МПа, а время экспозиции 3 мин.

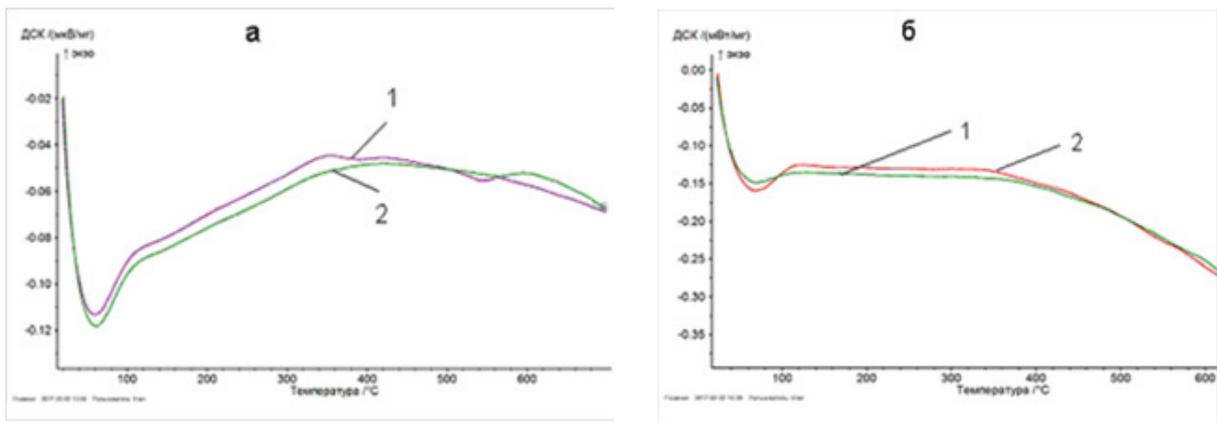


Рисунок 2 - Кривые ДСК образцов сплава Ti-50,7ат.%Ni после прокатки с током до $\epsilon=1,2$ (а) и последующей УЗО (б); кривые 1 – первый цикл нагрева, кривые 2 – повторный нагрев

На рис.2 показаны ДСК кривые образцов сплава Ti-50,7ат.%Ni после прокатки с током и последующей УЗО. Видно, что после прокатки наблюдается 2 пика энергии при температурах 350 (экзотермический) и 550°C (эндотермический), которые исчезают после повторного нагрева образца (рис.2а, кривая 2). Первый пик, вероятно, связан со снятием структурных напряжений в процессе нагрева, второй – с рекристаллизацией. После кратковременной УЗО (рис.2б) кривые ДСК после 1 и 2 цикла нагрева практически совпадают, что свидетельствует о достижении в материале под действием ультразвуковой обработки эффекта, аналогичного термическому (снятие внутренних напряжений).

Последовательное введение ультразвуковых колебаний и импульсов тока при комнатной температуре в сплаве Ti-50,7ат.%Ni приводит к появлению разнонаправленных скачков напряжения: вверх (от тока) и вниз (от УЗ), а при 200°C (в устойчивом аустените) все скачки направлены вниз (рис.3). Разнонаправленность скачков при комнатной температуре свидетельствует о различной природе акусто- и электропластического эффектов, которая требует дополнительных исследований.

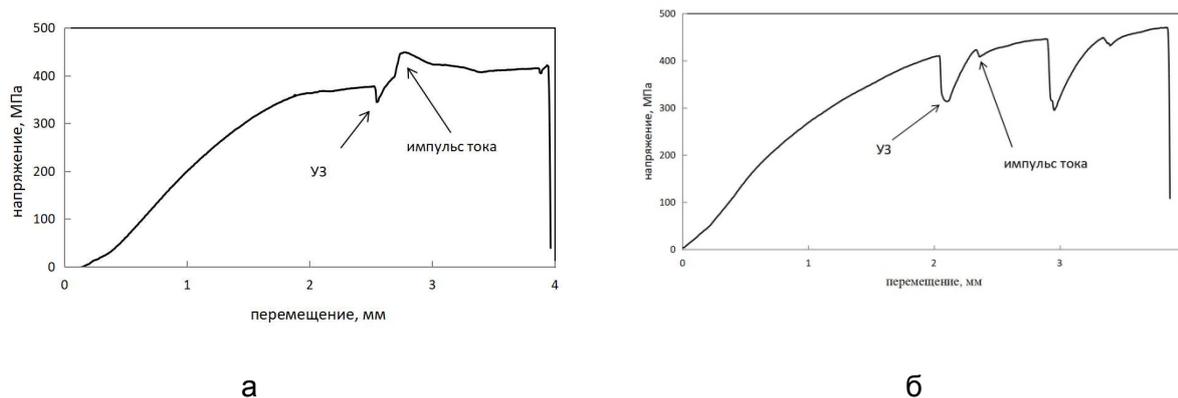


Рисунок 3 - Кривые «напряжение-перемещение» при растяжении сплава Ti-50,7ат.%Ni с последовательным введением ультразвука и импульсов тока при 20 (а) и 200 °С (б).

Совместное действие УЗ и тока исследовали на сплаве Ti-50,0ат.%Ni (рис. 4)

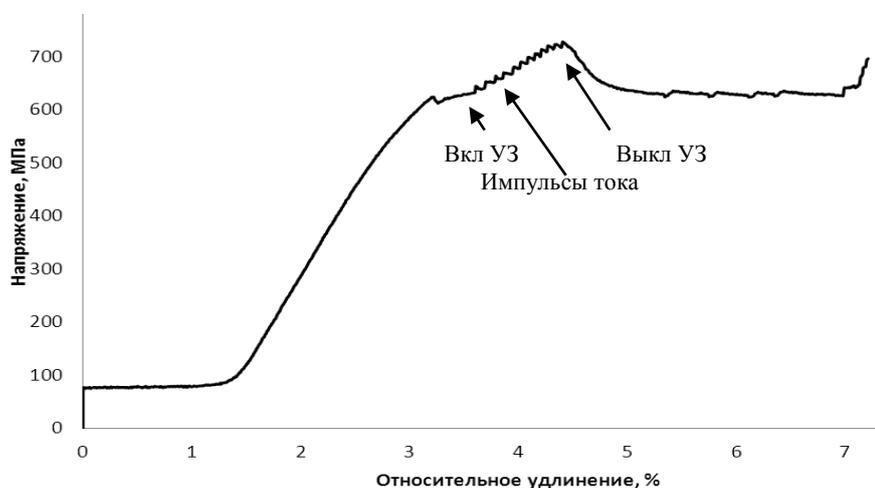


Рисунок 4 - Кривая «напряжение-деформация» при растяжении сплава Ti-50,0ат.%Ni с одновременным введением ультразвука и импульсов тока при 20°С

При введении импульсов тока одновременно с ультразвуком наблюдается их однонаправленное упрочняющее действие, резко отличающееся амплитудой скачков. Такая особенность может быть связана с обратным фазовым превращением $M \rightarrow A$ или / и с деформационным механическим воздействием, однако это требует дальнейших исследований.

Литература

1. Потапова А.А., Столяров В.В., Бондарев А.Б., Андреев В.А. Исследование возможности применения электропластической прокатки для получения прутков из сплава TiNi, *Машиностроение и инженерное образование*, 2, 2012, 33-38.
2. Rubanik V.V., Rubanik V.V., Dorodeiko V.G., Miliukina S.N., Influence of Ultrasonic Treatment on Shape Memory Effects in Ti-50,4 at.%Ni Alloy, *Mater. Sci. Forum*, V. 738-739 (2013) 362–366.
3. A.V. Kozlov, B.N. Mordyuk, A.V. Chernyashevsky. On the additivity of acoustoplastic and electroplastic effects, *Mater. Sci.&Eng.A190* (1995) 75-79.