

**ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА И УЛЬТРАЗВУКА НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ В СПЛАВАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ**

<sup>1,2</sup> Столяров В.В., <sup>1,2</sup> Мисоченко А.А., <sup>3</sup> Рубаник В.В., <sup>3</sup> Рубаник В.В. мл., <sup>3</sup> Царенко Ю.В.

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный институт «МИФИ»

г. Москва, Россия, E-mail: vlstol@mail.ru

<sup>3</sup> Институт технической акустики НАН Беларуси

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

Для производства металлических полуфабрикатов из сплавов с памятью формы традиционно используется термомеханическая обработка, включающая горячее прессование, ротационную ковку, прокатку, 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 задачи 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 (электропластический эффект) [1] или ультразвуковым воздействием [2] действительно позволяют существенно повысить технологические и эксплуатационные свойства, однако механизм такого воздействия недостаточно изучен. Кроме того, интерес представляет совместное действие обоих эффектов. Например, 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]. В этой работе было также показано, что совместное действие ЭПЭ и АПЭ меньше, чем сумма эффектов по отдельности и зависит от фазового состояния материала. В работе [4] представлен способ для ультразвукового электропластического плетения проволоки из вольфрама и других труднодеформируемых металлов и сплавов, который предусматривает одновременное использование в зоне деформации электрического тока и ультразвука.

Цель настоящей работы – исследование механического поведения никелида титана в условиях воздействия внешних электроимпульсного и/или ультразвукового полей.

Одна из особенностей обработки материала, обладающего эффектом памяти формы (ЭПФ), заключается в полной или частичной восстанавливаемости формы обработанного полуфабриката после отжига, что увеличивает количество операций в технологическом процессе. Так как производство изделий, обладающих ЭПФ, в современной промышленности связано с множеством промежуточных операций, представляет интерес оптимизации их количества в процессе производства. Для этого необходимо подавить эффект восстановления формы полностью или, хотя бы уменьшить его на этих этапах максимально. В готовом же изделии способность восстанавливать форму можно иницировать за счет выбора режимов термообработки. Таким образом, основной проблемой при волочении никелида титана, является восстановление геометрических размеров протянутой проволоки после проведения промежуточных отжигов для снятия напряжений. Это проявляется в уменьшении длины проволоки и увеличении ее диаметра.

Исследования проводили на проволоке из никелида титана примерно равноатомного состава диаметром 1,0 мм предварительно отожженной при температуре 550°C в течение 30 минут на воздухе. В качестве смазки использовали масло МС-20 с добавлением дисульфида молибдена. Скорость волочения составляла 0,3 м/с.

При деформации порядка 7% последующий отжиг приводит к полному восстановлению исходного диаметра проволоки. Если степень деформации между

промежуточными отжигами проволоки составляла от 14 до 23%, то наблюдается наиболее полное подавление эффекта восстановления формы, тем самым сокращается количество промежуточных технологических операций. При степенях деформации выше 23-25% эффект памяти формы полностью подавляется, но происходят частые обрывы заготовки.

Как известно [2], использование ультразвуковых колебаний в процессе обработки металлов давлением ведёт к снижению статического напряжения и, тем самым, упрощает технологическую цепочку, сократив количество переходов. В работе исследовали влияние УЗК на процесс волочения и свойства проволоки на основе никелида титана, обладающей эффектом памяти формы. Схема волочения проволоки представлена на рис.1.

Амплитуда смещений на торце волновода составляла 10 мкм. Твердосплавные волюки крепили в пучности смещений волновода продольных колебаний (рис.2).

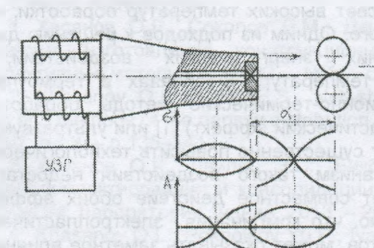


Рисунок 1 — Схема волочения проволоки никелида титана с УЗК

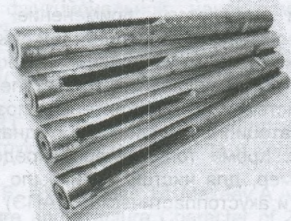


Рисунок 2 – Волноводы с закрепленными в пучности смещений волюками

После волочения исследовали степень восстановления формы. Для изучения степени влияния ультразвуковых колебаний на прочностные свойства протягиваемого металла проводили сравнительные испытания на разрыв после волочения в обычных условиях и с наложением УЗК на разрывной машине типа ZT 10/90.

Наложение ультразвуковых колебаний ведёт к снижению усилия волочения на 25-30% по сравнению с волочением в обычных условиях. С ростом степени деформации возрастает усилие волочения, причём при больших обжатиях (порядка 25%) наложение УЗК ведёт к обрыву проволоки. Значение степени восстановления формы практически совпадают для случая волочения с наложением ультразвука и в обычных условиях (рис.3). Термообработка проволоки после деформации менее 8% ведёт к практически полному возврату исходной формы, а после деформации свыше 20% ЭПФ в значительной мере подавляется. Результаты измерений предела прочности показывают, что проволока, протянутая в обычных условиях и с наложением УЗК, имеет практически одинаковые прочностные свойства.

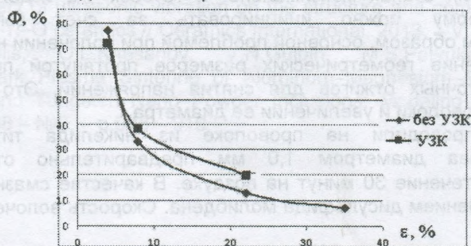


Рисунок 3 – Зависимость степени восстановления формы Ti-Ni проволоки ( $\Phi$ ) от величины единичных обжатий ( $\epsilon$ )

Снижение усилия волочения в результате воздействия ультразвука обусловлено как уменьшением сил контактного трения между обрабатываемой заготовкой и поверхностью инструмента, так и локальным разогревом материала в очаге деформации и изменением дислокационной структуры материала.

Процесс волочения осуществляли при комнатной температуре. В случае ультразвукового воздействия температура в очаге деформации не превышала 70°C. Поскольку превращение мартенсита в аустенит начинается при температуре  $A_{\text{н}} = 90^\circ\text{C}$ , следовательно, весь объем материала находился при волочении в мартенситном состоянии.

Практически одинаковая величина возврата формы проволоки протянутой в обычных условиях и с наложением ультразвука, её одинаковые прочностные свойства, могут говорить об идентичности механизмов пластической деформации в обоих случаях или о незначительном влиянии ультразвука на физико-механические свойства нитинола.

Также была исследована проволока с крупнозернистой и нанокристаллической аустенитной структурой из сплава Ti-Ni застехиометрического состава. При растяжении импульсный ток и ультразвуковые колебания в различной последовательности вводили в образец на разных стадиях деформации (упругой, квазиупругой, упрочняющей) и фиксировали величину электропластического и акустопластического эффекта. Анализ кривых растяжения показал, что оба эффекта структурнозависимы, имеют взаимное влияние, а величина и знак эффектов определяется размером зерен и стадией деформации. Рассмотрены потенциальные области практического применения результатов исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-58-00152) и БРФФИ (проект T16P-152).

#### **Список литературы:**

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*. – 2012. -№2. – с. 33-38.
2. Rubanik V.V., Rubanik V.V. jr., 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.
4. Троицкий О.А., Рыжков В.Г. Ультразвуковое электропластическое плетение трудно-деформируемых металлов и сплавов // *Цветная металлургия*. – 2009. – №11. – С. 37-38.