

**ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРУПНОЗЕРНИСТОГО СПЛАВА TiNi ПРИ
ПОСЛЕДУЮЩЕМ СТАРЕНИИ**

Чуракова А.А.^{1,2}, Гундеров Д.В.^{1,2}

¹*Институт физики молекул и кристаллов - обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук 450075, г. Уфа, пр. Октября, 151, Россия*

²*Уфимский государственный авиационный технический университет, 450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12, Россия*

Сплавы TiNi выделяются среди материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) наибольшими функциональными характеристиками, повышенной прочностью, пластичностью, коррозионной стойкостью, биосовместимостью и т.д. Вследствие этого они широко используются в технике и медицине [1-4]. Одним из видов термообработки является термоциклирование (ТЦ) через интервал мартенситных превращений, которое заключается в многократном повторении цикла «охлаждение ниже M_n – нагрев выше A_c » [5]. Термоциклирование приводит к изменениям в структурном (введение и размножение дислокаций) и напряженном состояниях, поэтому с его помощью можно управлять функциональными свойствами сплавов TiNi. Во-вторых, поскольку эти изменения в ходе термоциклирования стабилизируются, то стабилизируются и функциональные свойства, включая параметры однократного ЭПФ, сверхупругости и обратимого ЭПФ. Структурные изменения при термоциклировании приводят к изменению и механических функциональных свойств сплавов TiNi. В целом, исследования особенностей структурообразования и механические свойства при старении и термоциклировании сплавов на основе TiNi проводились давно, но в то же время ограниченное количество данных по влиянию термоциклирования с последующим старением на микроструктуру и механические свойства сплавов TiNi в различных состояниях.

В качестве материала исследования был использован интерметаллид системы TiNi. Сплав $Ti_{49}Ni_{51}$ - застехиометрический, основная фаза - аустенитная, имеющая B2 кристаллическую решетку, и фазу обогащенную никелем Ti_2Ni_3 . Для формирования твердого раствора на основе TiNi осуществляли закалку сплавов из области гомогенности (от 800°C) в воду. Термоциклирование образцов в различных исходных состояниях осуществлялось путем последовательного погружения образцов в жидкий азот (-196 °C) с последующим нагревом до температуры 150 °C, что заведомо ниже и выше температур M_n и A_c мартенситного превращения. Число термоциклов «нагрев – охлаждение» составило от 0 до 100. Толщина образцов, подвергнутых ТЦ, в сечении была менее 1 мм, что обеспечивало их быстрый прогрев и охлаждение. Время выдержки составило $t=8$ мин для обеспечения полного нагрева/охлаждения образцов. Механические испытания на растяжение проводили при температуре 25 °C на плоских образцах с рабочей базой $1 \times 0,25 \times 4,5$ мм со скоростью растяжения $1 \times 10^{-3} \text{c}^{-1}$.

Были проведены отжиги в интервале температур 250-500°C. Для сравнения полученных результатов выбраны исходные K3 состояния, K3+ТЦ ($n=20, 100$), а также K3+ТЦ ($n=20, 100$) + отжиг 400 °C, так как именно при этой температуре происходит интенсивное старение.

Таблица 1 - Данные механических испытаний на растяжение в различных состояниях

состояние		σ_B , МПа	σ_m , МПа	σ_T , МПа	δ , %
КЗ	Закалка 800°C	1020	255	540	33
	Отжиг 400°C	945	220	610	24
КЗ+ТЦ (n=20)		1005	345	665	22
КЗ+ТЦ (n=100)		970	330	635	21
КЗ+ТЦ+400°C (n=20)		980	205	690	21
КЗ+ТЦ+400°C (n=100)		935	215	565	18

Согласно результатам механических испытаний на растяжение ТЦ при n=20 приводит к повышению предела текучести, что связано с накоплением генерации дислокаций. Увеличение количества циклов до n=100 привело к незначительному падению текучести, что может быть связано с эффектом насыщением при ТЦ. Последующее старение при T=400°C после ТЦ показало, что предел текучести возрастает, что можно объяснить более равномерным распределением частиц старения на дислокационных сетках. Значительное падение после отжига T=400°C при n=100 циклах может быть связано с высокой плотностью дефектов и частиц старения, которое приводит к разрушению образцов при более низких значениях предела текучести, затрудняя движение дислокаций в процессе пластической деформации. При этом предварительное ТЦ по сравнению с состоянием без ТЦ, показывает, что в процессе старения повышается предел текучести и прочности, в то же время для объяснения полученных результатов необходимо проведение микроструктурных исследований.

Литература

1. Пушин, В.Г. Предпереходные явления и мартенситные превращения / В.Г. Пушин, В.В. Кондратьев, В.Н. Хачин. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 368 с.
2. Собянина, Г.А., Зельдович, В.И. Фазовые превращения в сплавах никелида титана. III Закономерности процесса старения IV. Мартенситные превращения в состаренных сплавах // ФММ.– 1998.– т.86.– №1.– с. 134–153.
3. Хачин, В.Н. Никелид титана: структура и свойства / В.Н. Хачин, В.Г. Пушин, В.В. Кондратьев. – М.: Наука, 1992. – 160с. - ISBN 5-02-007137-
4. Song, C. Structure and properties of amorphous and nanocrystalline TiNi prepared by severe plastic deformation and annealing / A.V. Sergueeva, C. Song, R.Z. Valiev, A.K. Mukherjee // Mater. Sci. Eng. – 2003. – A339, pp. 159-165.
5. Лихачев В.А., Кузьмин СЛ., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Л. – Изд-во ЛГУ, 1987. – 216 с.
6. Z.G. Wang, X.T. Zu, P. Fu, J.Y. Dai, S. Zhu, L.M. Wang. Mater. Eng. A – 2003, 360, 126
7. X.M. He, L.Z. Zhao, X.M. Wang, R.F. Zhang, M.S. Li. Mater. Sci. Eng. A - 2006, 427, 327
8. Nishida M., Honma T. Scripta Met., 1984. V18. P. 1293
9. Nishida M., Honma T. Effect of heat treatment on the all-round shape memory effect in Ti-51 at. % Ni // Scr. met. 1984. - V. 18. - №11. P. 1299-1302.