

УДК [669.295 + 620.18]: 539.62

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРЕН И ТЕМПЕРАТУРЫ КОНТАКТА НА
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$

С. В. Чертовских¹, Л. Ш. Шустер¹, А. А. Мисоченко², В. В. Столяров²

¹Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа,

²Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, г. Москва

E-mail: chertovskikh@mail.ru

$TiNi$ -сплавы с эффектом запоминания формы обладают высоким комплексом механических и функциональных свойств (биосовместимость, коррозионностойкость, низкая плотность, высокая удельная прочность, память формы, сверхупругость, пластичность, высокая жаропрочность), особенно в ультрамелкозернистом (УМЗ) [1] и наноструктурном (НС) состоянии [2]. Триботехнические свойства данных сплавов изучали в УМЗ состоянии (средний размер зерна $d = 250 \div 300$ нм), полученном методом равноканального углового прессования [3], а также в НС состоянии ($d \approx 80$ нм), полученном электропластической деформацией [4]. Представляет интерес выявление зависимостей триботехнических характеристик от степени дисперсности структуры и температуры контакта. Поэтому данная работа посвящена изучению влияния дисперсности структуры (полученной ЭПП и последующими отжигами при различных температурах) сплава $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ на его триботехнические характеристики в широком интервале температур и нагрузок.

В качестве исследуемого материала использовали сплав $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ в форме полосы $2 \times 6 \times 150$ мм³, закаленный в воду после выдержки 0,5 ч при температуре 700 °С и имеющий крупнозернистую структуру аустенита (B2-фазы) со средним размером зерен 80 мкм. Для измельчения структуры (и получения различной степени ее дисперсности) полосу подвергали прокатке с током [2] до степени деформации $e = 1,54$ и последующим отжигам при различных температурах. Прокатку проводили на двухроликовом стане, оборудованном генератором импульсного тока, который оказывает электростимулирующее действие на технологическую пластичность труднодеформируемых сплавов [5]. Для подведения и съема тока использовали скользящий контакт (отрицательный полюс) до зоны деформации образца и один из валков (положительный полюс). Прокатку вели при комнатной температуре со скоростью 50 мм/с при минимальном разовом обжатии по толщине 25 мкм. Однополярный импульсный ток вводился

от генератора с частотой импульсов 610 Гц, длительностью импульсов 160 мкс. Прокатка велась при постоянной плотности тока ($\sim 125 \text{ А/мм}^2$). После каждого шага прокатки образцы охлаждали в воде, чтобы избежать влияния возможного нагрева. В результате для экспериментального исследования триботехнических характеристик были получены образцы из сплава $\text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$ в разных структурных состояниях (от КЗ до УМЗ и НС):

- 1) крупнозернистое (закалка: нагрев до температуры $700 \text{ }^\circ\text{C}$, выдержка 30 мин и охлаждение в воду; средний размер зерна $d \approx 80 \text{ мкм}$);
- 2) прокатка с током до степени деформации $e = 1,54$ и отжиг 30 мин при $550 \text{ }^\circ\text{C}$, $d \approx 250 \text{ нм}$;
- 3) прокатка с током до $e = 1,54$ и отжиг 30 мин при $500 \text{ }^\circ\text{C}$, $d \approx 100 \text{ нм}$;
- 4) прокатка с током до $e = 1,54$ и отжиг 30 мин при $450 \text{ }^\circ\text{C}$, $d \approx 20 \div 30 \text{ нм}$.

Известно [6], что активным фактором, определяющим схватывание трущихся поверхностей, является отношение тангенциальной прочности τ_n адгезионной связи на срез контактирующих в процессе трения тел и нормального напряжения на контакте p_r . Это отношение (τ_n / p_r) является адгезионной составляющей коэффициента трения f_M , от которого зависит глубинное деформирование приконтактных слоёв.

В данной работе для оценки триботехнических параметров в условиях пластического контакта (τ_{mn}, p_m, f_M) использовали экспериментальный метод [3, 4, 6], в основе которого принята физическая модель, которая в первом приближении отражает реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте.

В качестве индентора использовали двусторонние сферические цилиндрики (радиусом 2,5 мм и высотой 25 мм) из твёрдосплавного инструментального материала ВК8 (8 % Со; 92 % WC). Образцы для исследований (пластинки размерами $\approx 6 \times 20 \text{ мм}$ и толщиной $1 \div 2 \text{ мм}$, закрепленные на стальные подложки диаметрами $15 \div 20 \text{ мм}$ и толщиной 5 мм) из сплава $\text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$ находились в четырех вышеперечисленных состояниях структуры.

На рис. 1 представлены температурные зависимости (в интервале от 20 до $800 \text{ }^\circ\text{C}$) триботехнических параметров τ_{mn} , p_m и f_M , полученные в условиях пластического контакта на образцах никелида титана с различным состоянием структуры.

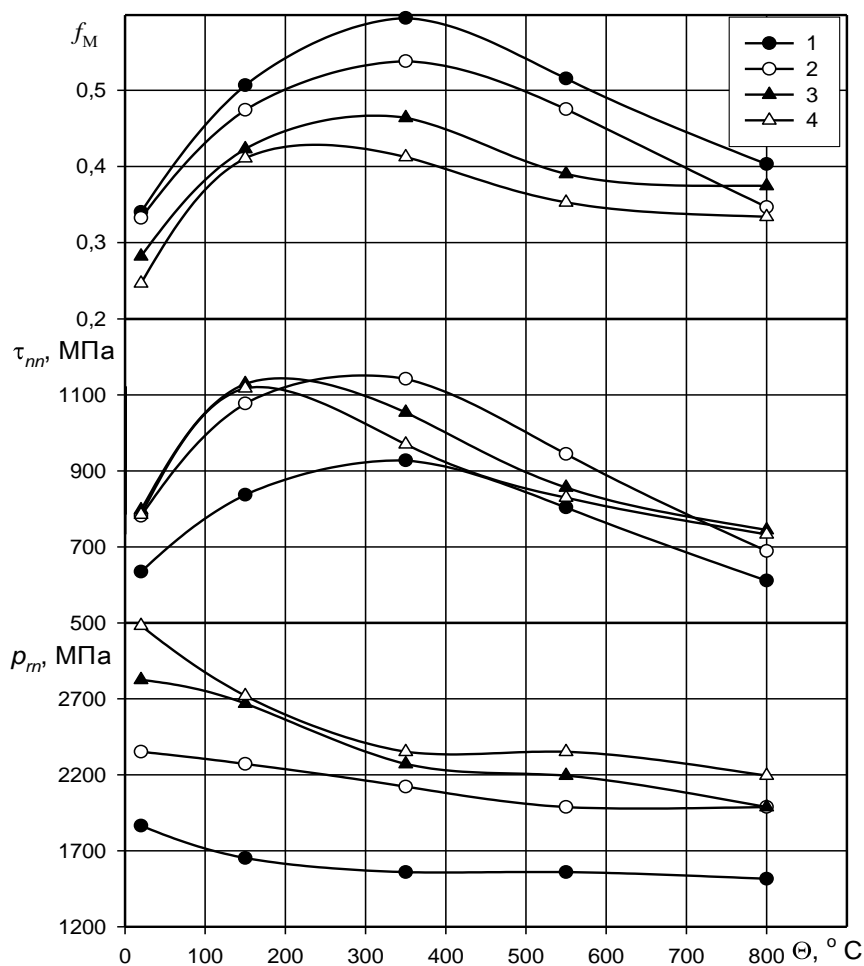
Из рис. 1, б видно, что сдвиговые напряжения τ_{mn} для всех состояний сначала возрастают, а затем уменьшаются с повышением температуры, однако их значения для УМЗ и НС никелида титана несколько выше, чем для КЗ TiNi .

Нормальные напряжения p_m с повышением температуры контакта для всех состояний исследуемых образцов также уменьшаются (рис. 1, в).

Из рис. 1, в видно, что предельные нормальные напряжения на контакте p_m , соответствующие пластическому контакту, уменьшаются с повышением температуры для всех состояний вследствие разупрочнения материала, но также и видно, что измельчение структуры в никелиде титана упрочняет его и существенно повышает предельные нормальные напряжения p_m .

При наличии пластических деформаций на трибоконтакте прочность τ_{nm} адгезионных связей на срез прямо пропорциональна предельным нормальным напряжениям p_m на контакте:

$$\tau_{nm} = \tau_0 + \beta \cdot p_m. \quad (1)$$



a – молекулярную составляющую коэффициента трения; b – прочность на срез адгезионных связей; v – нормальные напряжения на контакте

Рисунок 1 – Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ (1 – $d \approx 80$ мкм; 2 – $d \approx 250$ нм; 3 – $d \approx 100$ нм; 4 – $d \approx 20 \div 30$ нм) – ВК8

НС материалы имеют повышенную величину p_m , и их неравновесные границы зерен обладают избыточной энергией, что приводит к увеличению τ_m (по сравнению с КЗ состоянием). Но в результате инициирования трением процессов релаксации, возникновения вторичных структур на контакте прочность τ_m адгезионных связей на срез может увеличиваться в меньшей мере, чем величина p_m . В результате этого адгезионная составляющая коэффициента трения f_M может снижаться [3, 4], что и видно на рис. 1, а (значения f_M для никелида титана снижаются с увеличением степени дисперсности структуры). Температура Θ контакта, изменяя величины τ_m и p_m , оказывает дополнительное влияние на величину f_M . Максимальные значения f_M для всех структурных состояний наблюдались при температуре 350 °С.

Таким образом, с уменьшением размера зерна структуры в сплаве $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ (особенно при формировании наноструктуры) повышаются его прочностные характеристики, существенно снижается адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения f_M и уменьшается его склонность к схватыванию в процессе трения. Максимальные значения f_M для всех структурных состояний наблюдались при температуре 350 °С. Полученные результаты расширяют представление о трибологическом поведении сплава в наноразмерной области, согласуются с результатами [3, 4] и позволяют прогнозировать улучшение эксплуатационных характеристик при использовании НС никелида титана в трибосопряжениях деталей машин при различных температурно-силовых условиях работы.

Библиографический список

1 Столяров, В. В. Структурные особенности, механические свойства и эффект памяти формы в TiNi сплаве, полученном равноканальным угловым прессованием [Текст] / В. В. Столяров, Е. А. Прокофьев, С. Д. Прокошкин, С. В. Добаткин и др. // ФММ. – 2005. – Т. 100, № 6. – С. 91-102.

2 Stolyarov, V. V. Severe electroplastic deformation of TiNi alloy / V. V. Stolyarov, U. Kh. Ugurchiev, I. B. Trubitsyna, S. D. Prokoshkin, E. A. Prokofiev // Физика и техника высоких давлений. – 2008. – Т. 16, № 4. – С. 64-67.

3 Чертовских, С. В. Триботехнические свойства нитинола, полученного интенсивной пластической деформацией [Текст] / С. В. Чертовских, Л. Ш. Шустер, В. В. Столяров // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 1. – С. 80-83.

4 Чертовских, С. В. Триботехнические характеристики наноструктурного сплава $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$, полученного электропластической деформацией [Текст] / С. В. Чертовских, Л. Ш. Шустер, В. В. Столяров // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – № 2. – С. 17-21.

5 Троицкий, О. А. Физические основы и технологии обработки современных материалов в 2 т. Т. 1 [Текст] / О. А. Троицкий, Ю. В. Баранов, Ю. С. Авраамов, А. Д. Шляпин. – М. – Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2004.

6 Шустер, Л. Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел [Текст]. – Уфа : Гилем, 1999. – 199 с.