

УДК [669.295 + 620.18]: 539.62

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИТИНОЛА, ПОЛУЧЕННОГО ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

© Сергей Владимирович Чертовских¹, Лёва Шмульевич Шустер¹, Владимир Владимирович Столяров²

¹УГАТУ, Уфа, Россия

²ИМАШ РАН, Москва, Россия

vlstol@mail.ru

***Аннотация.** Исследована температурная зависимость триботехнических характеристик сплава с памятью формы в крупнозернистом и ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии. Показано, что формирование УМЗ структуры в сплаве Ti_{49,7}Ni_{50,3} повышает его прочностные характеристики, снижает адгезионную составляющую коэффициента трения и уменьшает его склонность к схватыванию.*

В настоящее время нитинол занял особое место в ряду современных материалов. У этого материала интересная история, принесящая много открытий, которым он обязан своему сегодняшнему успеху: нитинол благодаря уникальным свойствам, такими как биосовместимость, память формы, сверхэластичность, пластичность, малый удельный вес, высокая жаропрочность и т.д. успешно применяется в медицинской и авиакосмической технике, в машиностроении. Известно [1, 2], что при трении титановые сплавы на основе нитинола имеют высокие коэффициенты трения и склонны к схватыванию (налипанию, сварке) с последующим повреждением поверхностей контакта. Этот недостаток хорошо известен для поликристаллического крупнозернистого нитинола и особо ярко проявляется при повышенных температурах контакта. Особенности трибологического поведения этого материала в ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии с размером зерен менее 1 мкм могут заметно отличаться от таковых для крупнозернистых аналогов и требуют проведения теоретических и экспериментальных исследований.

Данная работа посвящена изучению влияния структурных состояний с разным размером зерен, полученных интенсивной пластической деформацией (ИПД), на триботехнические свойства нитинола (Ti_{49,7}Ni_{50,3}) в широком интервале температур и нагрузок.

В качестве исследуемого материала использовали закаленный (выдерживание в электропечи один час при температуре 800° С с последующим охлаждением в воду) пруток Ø16 мм из нитинола (Ti_{49,7}Ni_{50,3}). Структура исходного исследуемого материала была крупнозернистой со средним размером зерен 50 - 80 мкм. Для измельчения структуры пруток из Ti_{49,7}Ni_{50,3} подвергали тепловому равноканальному угловому прессованию (РКУП) [3] при температуре 450° С. Схема РКУ прессования представлена на рис. 1. Количество проходов – 6, угол пересечения каналов 110°.

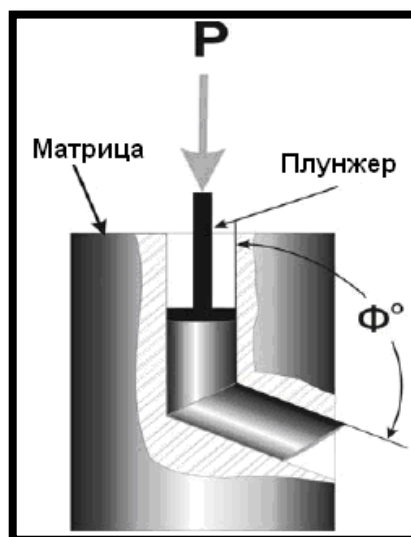


Рис. 1. Принципиальная схема РКУ прессования

В результате была получена однородная по объему прутка микроструктура со средним размером зерен 0,25 - 0,3 мкм. Типичные виды микроструктур в поперечном сечении (оптическая и просвечивающая электронная микроскопия) исходного (закаленного) и интенсивно деформированного методом РКУП нитинола представлены на рис. 2. Механические свойства никелида титана в различных структурных состояниях представлены в таблице 1.

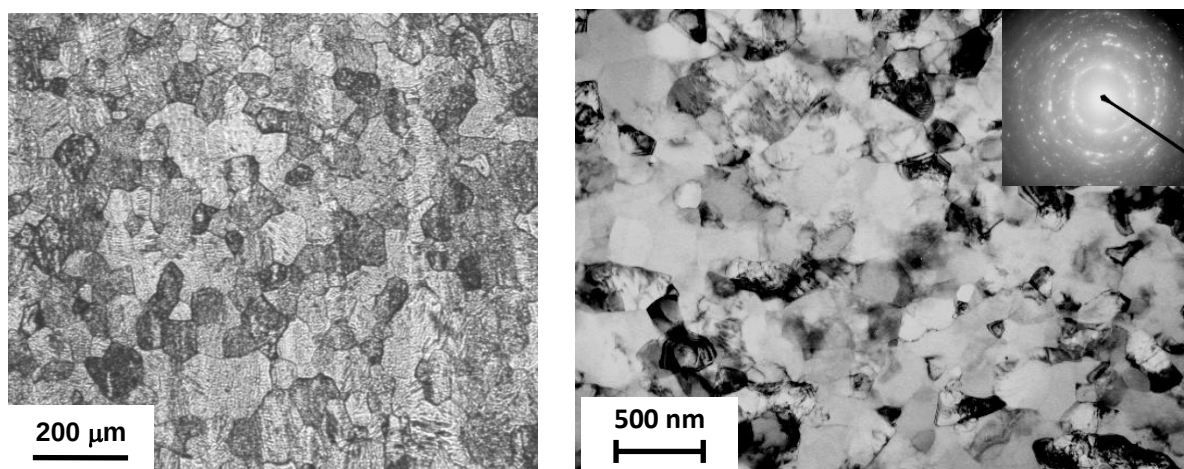


Рис. 2. Микроструктура нитинола: а) исходное состояние (закаленное) и б) подвергнутое РКУП. Поперечное сечение.

Таблица 1.

Механические свойства нитинола в различных состояниях

Состояние	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Исходное (закаленное)	600	940	40
Подвергнутое РКУП	1150	1250	25

Известно [1], что активными факторами, определяющими схватывание трущихся поверхностей, являются устойчивость материалов фрикционной пары к локальному сдвигу и, в значительной степени, соотношение тангенциальной прочности τ_{nn} адгезионной связи на срез контактирующих в процессе работы тел и нормального напряжения на контакте p_{rn} . Это соотношение (τ_{nn} / p_{rn}), по-существу, является адгезионной составляющей коэффициента трения, от которого зависит глубинное деформирование приконтактных слоёв.

В данной работе для оценки триботехнических параметров в условиях пластического контакта (τ_{nn} , p_{rn} , τ_{nn} / p_{rn} , τ_0 (прочность адгезионных связей на срез в отсутствии нормальной нагрузки), β (коэффициент упрочнения адгезионных связей от действия нормальной нагрузки)) использовали экспериментальный метод [1, 2]. В основе этого метода принята физическая модель (рис. 3), которая в первом приближении отражает реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте.

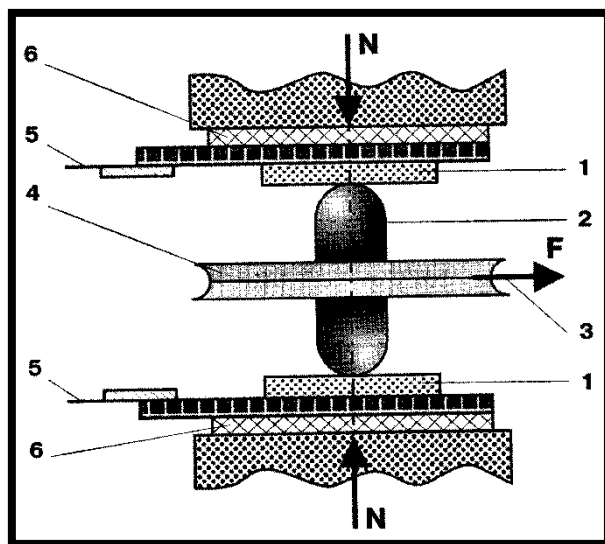


Рис. 3. Модель фрикционного контакта

Согласно этой модели, сферический индентор 2 (радиусом 2,5 мм и высотой 25 мм) из твёрдосплавного инструментального материала ВК8 (8% Со; 92% WC), сдавленный двумя плоско-параллельными образцами 1 (с высокой точностью и чистотой контактирующих поверхностей) вращается под нагрузкой вокруг собственной оси. Сила F , расходуемая на вращение индентора и приложенная к тросику 3, уложенному в паз диска 4, связаны главным образом со сдвиговой прочностью τ_{nn} адгезионных связей. С целью использования этого способа применительно к условиям повышенных температур контакта разработана и создана специальная аппаратура, позволяющая производить электроконтактный нагрев (через шины 5, изолированные от корпуса прокладками 6, рис. 1) зоны соприкосновения и обеспечивать характерное для трибоконтакта распределение температуры в приповерхностном слое. Разработаны также методы тарирования регулирования температуры контакта, а также получение зависимости величины τ_{nn} от нормальных напряжений p_{rn} при различных температурах контакта.

Образцы для исследований (диаметром 16 мм и высотой 6 мм) вырезали из прутка сплава $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$ в поперечном направлении в двух состояниях: а) закаленном с температуры $800^{\circ}C$; б) обработанном методом теплового РКУП. Шероховатость поверхности образцов и индентора $Ra = 0,63 - 0,80$ мкм. Угловая скорость вращения индентора вокруг собственной оси составляла $0,1\ c^{-1}$. Длительность прогрева образца и его испытания при данной температуре не превышало 1 мин. Все измерения трибологических свойств для каждого состояния при комнатной и повышенных температурах были выполнены на одних и тех же образцах.

На рис. 4 приведены температурные зависимости триботехнических параметров τ_{nn} , p_{rn} и τ_{nn}/p_{rn} , полученные на образцах нитинола, находящегося в разном структурном состоянии.

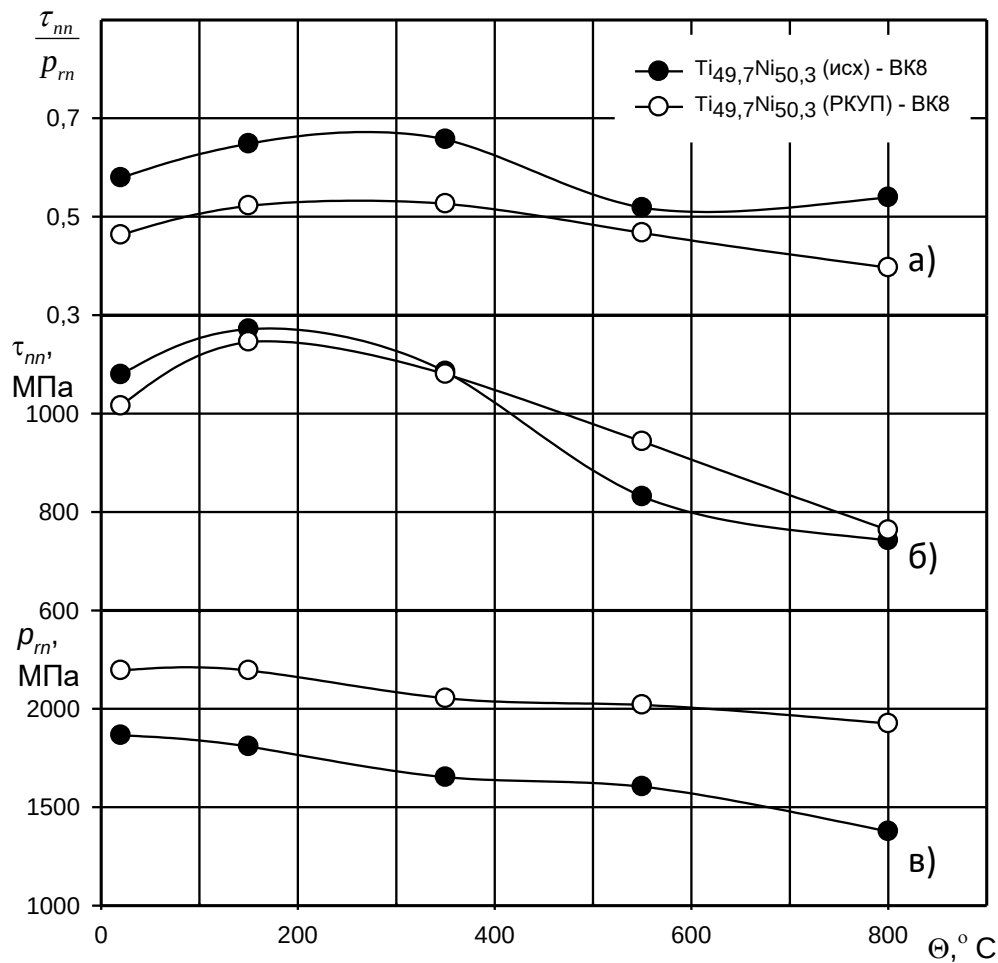


Рис. 4. Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$ (исходный и после теплового РКУП) – ВК8: а) молекулярную составляющую коэффициента трения; б) прочность на срез адгезионных связей; в) нормальные напряжения на контакте

Из рис. 4, б видно, что сдвиговые напряжения τ_{nn} для всех состояний сначала возрастают, а затем уменьшаются с повышением температуры, однако их соотношение принципиально отличается для температур ниже и выше $\approx 350^{\circ}C$. При температурах ниже $350^{\circ}C$ параметр τ_{nn} для состояния РКУП ниже значений для исходного нитинола, а при температурах выше $350^{\circ}C$, наоборот выше этих значений. Нормальные напряжения p_{rn} с повышением

температуры контакта для всех состояний исследуемых образцов также уменьшаются (рис. 4, в). Из рис. 4, в видно, что измельчение структуры в нитиноле упрочняет его и повышает предельные нормальные напряжения p_{rn} , соответствующие пластическому контакту. Увеличение прочностных характеристик, в том числе предельных нормальных напряжений определяется соотношением Холла-Петча [4], где величина предела текучести σ_T связана с размером зерна d эмпирическим соотношением

$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}, \quad (1)$$

где σ_0 и k – постоянные для данного материала.

Значения адгезионной (молекулярной) составляющей коэффициента трения τ_{nn} / p_{rn} (рис. 4, а) для УМЗ нитинола значительно ниже, чем для крупнозернистого (исходного) нитинола.

Заключение. Формирование УМЗ структуры в сплаве $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$ повышает его прочностные характеристики, снижает адгезионную составляющую коэффициента трения и уменьшает его склонность к схватыванию. Полученные данные позволяют прогнозировать улучшение эксплуатационных характеристик при использовании УМЗ нитинола в трибосопряжениях деталей машин при различных температурно-силовых условиях работы, а также улучшение его обрабатываемости при механической обработке на стадии технологической подготовки производства.

Список литературы

1. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом. – М.: Машиностроение, 1988. – 96 с.
2. Крагельский И.В., Михин Ю.М. Узлы трения машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
3. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
4. Васин Р.А., Еникеев Ф.У. Введение в механику сверхпластичности: В 2 ч. – Уфа.: Гилем, 1998. – Ч.1. – 280 с.

Дата поступления статьи: 16 ноября 2016 года.