

УДК 669.295.5:539.62

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИКЕЛИДА ТИТАНА**

В.А. Хохлов, А.И. Потекаев\*, А.Н. Табаченко\*, С.В. Галсанов

Томский государственный университет

\*Сибирский физико-технический институт им. акад. В.Д. Кузнецова, г. Томск

E-mail: potekaev@spti.tsu.ru

Исследовано влияние скоростей скольжения и давлений на интенсивность износа, температуры в зоне контакта и коэффициенты трения. Показано, что сопротивление износу никелида титана намного выше, чем у классических износостойких материалов. С позиций мартенситных превращений выявлены механизмы изнашивания и природа аномально высокой износостойкости. Определены интервалы изменения скоростей и давлений, в которых износ меняется от установившегося до катастрофического. Эти результаты дают возможность выбора их оптимальных значений при проектировании узлов трения.

**Ключевые слова:**

Триботехнические свойства, память формы, никелид титана, трение, износ.

**Key words:**

Tribological properties, shape memory, titanium nickelide, friction, wear.

**Введение**

Никелид титана (TiNi) относится к классу материалов с памятью формы. Особенностью их является изменение фазового состава в условиях термического или силового воздействия. Эти изменения характеризуются прямыми и обратными мартенситными превращениями, в результате которых аустенитная фаза А переходит частично или полностью в новую мартенситную фазу М (реализуется прямое А→М превращение), существенно отличающуюся по свойствам от исходной. При снятии внешнего воздействия происходит частичное или полное обратное М→А превращения [1].

По опыту эксплуатации контактов с трением (например, в медицинской технике, в условиях абразивного изнашивания, в износостойких покрытиях и др.), а также по данным ряда научных работ никелид титана показал повышенную износостойкость, приближающуюся по этому показателю к высокоизносостойким материалам.

Важность исследования трения никелида титана несомненна, но информация в литературе по этому вопросу незначительна [2–7].

В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований износа, износостойкости, температур и коэффициентов трения сплавов никелида титана нескольких составов.

**Методика и материалы исследований**

Исследования проведены на машине трения СМТ-1 модели 2070 по схеме неподвижная колодка (образец) – жесткий вращающийся диск (контртело). Конструкция рабочего узла машины позволяла измерять температуру непосредственно вблизи зоны контакта образца с диском.

Использовались образцы в виде цилиндров диаметром 9 мм и высотой 10 мм следующих составов, отличающихся содержанием и характеристическими температурами начала мартенситного превращения  $M_n$ :  $Ti_{50}Ni_{47,5}Fe_{2,5}$  (ТН-1К),  $Ti_{49,4}Ni_{50,6}$ ,

$Ti_{49,9}Ni_{50,1}$ ,  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$ ;  $M_n$  равнялась –80, 0, +40, –20 °С, соответственно. Для сравнения испытывались классические износостойкие материалы: БРАЖ 9-4, Чугун С42-40, Сталь 40Х.

Термообработка сплавов проводилась по режиму гомогенизирующего отжига: нагрев при давлении  $10^{-3}$  Па до температуры  $T=800$  °С с выдержкой 1 ч.

Контртело (диск): сталь ШХ-15 с HRC=62 ед.

В ходе испытаний задавались давления  $q=3,15...9,46$  МПа, скорости вращения диска  $v=0,52...2,07$  м/с. Регистрировались температура  $T$ , весовой износ  $Q$  и момент трения, который пересчитывался на коэффициент трения  $\mu$ .

Интенсивность изнашивания  $I$  определялась из отношения весового износа к пути трения. Исследования поверхностных слоев проводились на нанотвердомере «CSEM instruments» и 3D профилографе (профилометре) «Still».

**Результаты исследования триботехнических свойств**

На рис. 1 приведены зависимости весового износа  $Q$  от времени работы в период приработки и в установившемся режиме для всех исследуемых материалов. Как видно, износ никелида титана намного ниже износа традиционных износостойких материалов. Внутри группы сплавов TiNi выявить четкую зависимость износа от температур  $M_n$  не представилось возможным.

Отметим особенности кривых износа, вытекающие из рис. 1. Прежде всего, для никелида титана характерно малое по сравнению с другими материалами время приработки и достаточно быстрый выход на режим установившегося износа. Далее, при указанных  $v$  и  $q$ , как показывают наши опыты, имеет место очень длительный его временной интервал. Практически выйти на режим катастрофического износа при давлениях  $q$  до 4,72 МПа и скоростях  $v$  до 1,02 м/с нам не удалось. Из рис. 1 видно, что наиболее предпочтительным является сплав  $Ti_{49,9}Ni_{50,1}$ , однако различие в износах указанных сплавов несущественное.

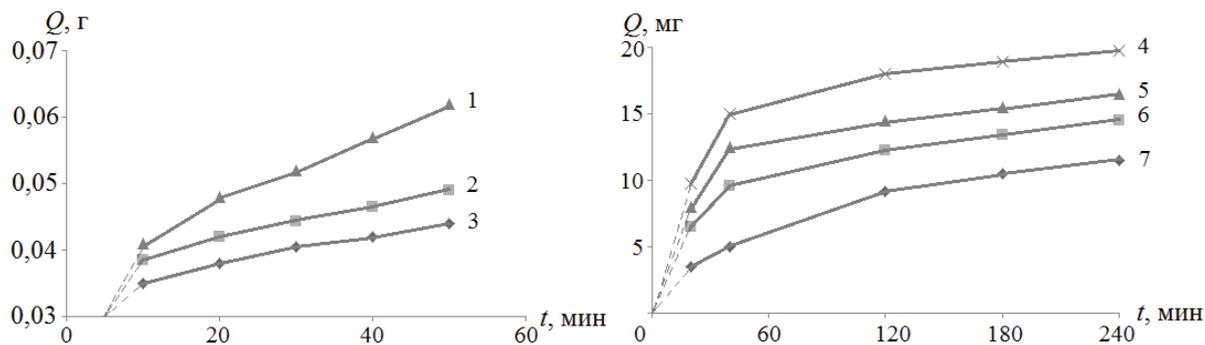


Рис. 1. Зависимость износа сплавов от времени.  $q=3,15$  МПа,  $v=1,02$  м/с. Материал: 1) чугун С42-40; 2) сталь 40Х; 3) БРАЖ 9-4; 4) ТН-1К; 5)  $Ti_{49,4}Ni_{50,6}$ ; 6)  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$ ; 7)  $Ti_{49,9}Ni_{50,1}$

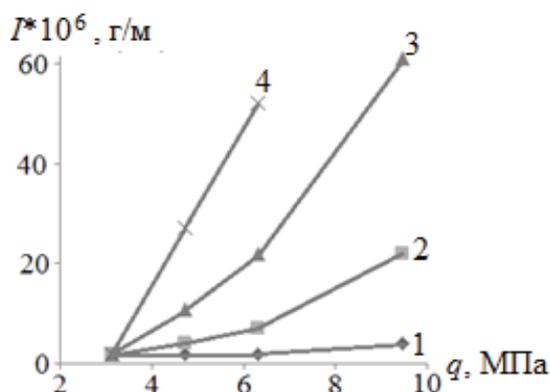


Рис. 2. Зависимости интенсивности изнашивания от давления при скоростях скольжения: 1) 0,52; 2) 1,02; 3) 1,57; 4) 2,07 м/с

Продолжим рассмотрение триботехнических свойств на примере сплава  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$ . На рис. 2 приведены зависимости интенсивности износа  $I$  от давления для разных  $v$ . Анализ опытных данных показал следующее:

- Во всех случаях наблюдается рост  $I$  по мере увеличения  $v$  и  $q$ .
- Различие в интенсивностях  $I$  для  $v < 1,02$  м/с и  $q < 6,3$  МПа небольшое (линии 1, 2 на рис. 2), а кинетика износа аналогична изменению  $I$  во времени при малых  $v$  и  $q$ .
- Большие значения скоростей скольжения и давлений приводят к неустойчивости процесса трения уже в начальные периоды времени (15...20 мин) и катастрофическому износу (линии 3, 4 на рис. 2).
- Наибольшее влияние на износ оказывает скорость скольжения. Это видно по линиям 3, 4 (рис. 2), согласно которым устойчивое течение процесса изнашивания нарушается уже в интервале  $v=1,02...1,57$  м/с.
- Совместное действие высоких скоростей и высоких давлений приводит к неустойчивости процесса трения уже на ранней стадии изнашивания.

Следует отметить, что четкой количественной границы, разделяющей периоды приработки, устойчивого и неустойчивого трения, нет. Переход

от одного к другому виду осуществляется в некоторых интервалах скоростей и давлений.

Большое влияние на характер износа и износостойкость оказывает температура в зоне контакта. На рис. 3 приведены зависимости температуры от давлений при разных скоростях для сплава  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$ , из которых видно, что идет возрастание  $T$  при увеличении значений  $v$  и  $q$ . Причем температура увеличивается от исходной почти втрое при больших значениях  $v$  и  $q$ . Этот рост вполне достаточен для изменения структурно-фазового состояния, свойств поверхностных слоев и смены механизмов износа.

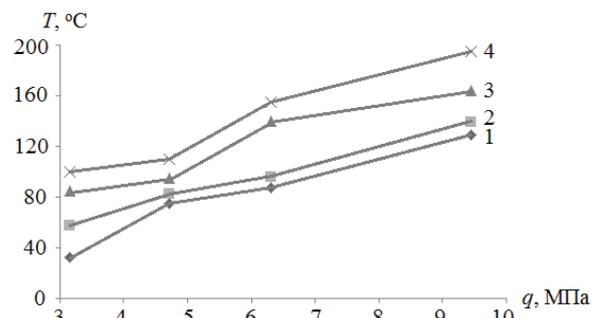


Рис. 3. Зависимости температуры трения от давления при разных скоростях скольжения: 1) 0,52; 2) 1,02; 3) 1,57; 4) 2,07 м/с

Изменение коэффициентов трения  $\mu$  в функции скоростей и давлений показано на рис. 4. Из полученных данных видно, что коэффициенты трения снижаются с возрастанием давления.

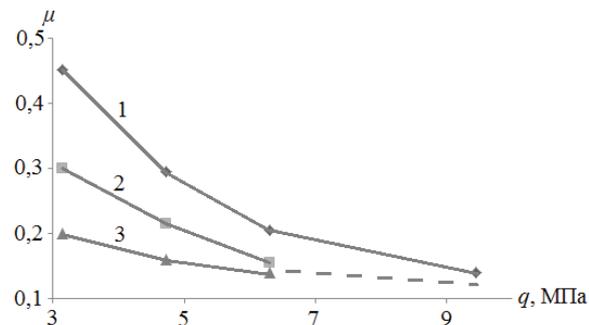


Рис. 4. Зависимости коэффициентов трения от давления для разных скоростей: 1) 0,52; 2) 1,02; 3) 1,57 м/с

Аналогичные зависимости  $I$ ,  $T$  и  $\mu$  лишь с небольшими количественными изменениями были получены и для сплавов других составов.

Результаты исследования триботехнических свойств позволили на основе анализа зависимостей износа и интенсивностей изнашивания выделить три зоны  $I$  в зависимости от  $v$  и  $q$ . Первая – зона с легкими режимами работы ориентировочно при  $v < 1,0 \dots 1,2$  м/с и  $q < 5,1 \dots 5,2$  МПа. Здесь наблюдается очень большой по времени участок установившегося износа. На этих значениях  $v$  и  $q$  основана работа большинства элементов и узлов с трением. Вторая – зона со средними режимами скоростей скольжения и давлений:  $v \approx 1,2 \dots 1,4$  м/с и  $q \approx 5,3 \dots 5,8$  МПа. На первой половине этих интервалов время установившегося износа достаточно велико, хотя и короче аналогичного участка первой зоны. Третья зона характерна значениями  $v > 1,4$  м/с и  $q > 5,8$  МПа, при которых участок установившегося износа мал или отсутствует совсем. Работа узла в этом случае кратковременна, сопровождается вибрациями и скрежетом.

Разумеется, границы этих значений условны, т. к. они зависят от целого ряда факторов: материалов контактирующих пар, температуры, условий трения и т. п. Но, тем не менее, это деление дает ясное представление о характере процесса трения и износа в определенных скоростных, силовых интервалах и может быть использовано для оптимизации рабочих параметров при проектировании узлов трения.

#### Исследование продуктов изнашивания

Частицы износа являются активными участниками процесса трения. Образовав как бы третье тело, они участвуют в процессе трения и влияют на его ход и результаты. В нашей работе использовался оптический метод, обеспечивающий получение качественных (размерных) и количественных (весовых) характеристик частиц износа.

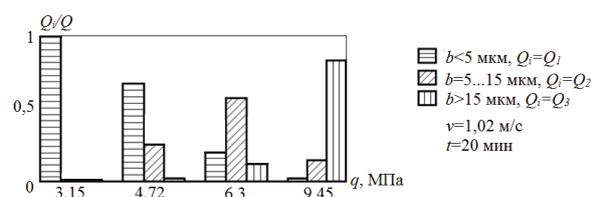


Рис. 5. Зависимость дисперсного состава частиц износа от давления

На рис. 5 представлены зависимости дисперсного состава частиц износа от давлений. Из этой диаграммы видно размерное и весовое  $Q_i$  изменение частиц от мелкодисперсных фракций до крупных частиц при увеличении скоростей и давлений. На лёгких режимах работы частицы износа в большинстве случаев выглядят в виде тонких пластинок округлой формы с наибольшим размером  $b$  до 5 мкм ( $Q_i = Q_1$ ). На средних режимах работы размеры их изменялись от 5 до 15 мкм ( $Q_i = Q_2$ ). При тяжёлых режимах работы наблюдается изме-

нение формы частиц износа. Они представляют из себя частично плоские и объёмные фигуры TiNi размером свыше 15 мкм ( $Q_i = Q_3$ ), а также пластины, завёрнутые в спираль или складчатой (гофрированной) формы больших размеров. Данные результаты свидетельствуют о смене вида изнашивания.

#### Анализ результатов исследования

Введем некоторые положения, касающиеся контакта образца и контртела.

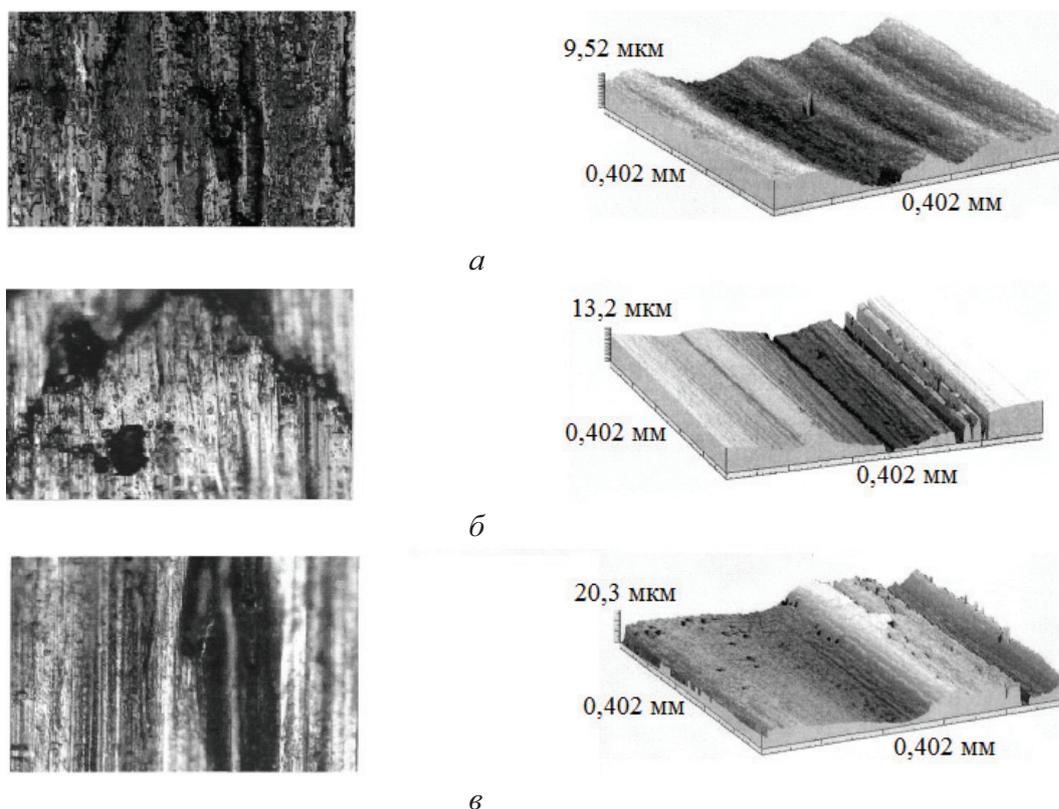
Контакт дискретный. Касание тел происходит в микрообластях, суммарная площадь которых на порядки меньше номинальной. В каждом микрообъёме возникают давления, намного превышающие заданные. Поэтому процессы контактного взаимодействия и трения рассматриваются сначала на контакте единичных микронеровностей, которые в задачах трения моделируются, как правило, сферическими сегментами [2].

Возникновение больших фактических давлений приводит к А→М превращениями с образованием деформационного мартенсита, а повышение температуры вызывает обратное М→А превращение.

Поверхностные и подповерхностные слои имеют сложное строение и свойства. Так наши исследования [8] показали, что в приконтактной области под нагрузкой образуются три слоя с разным структурно-фазовым состоянием: слой аустенит-мартенситного состояния, слой со структурой мартенсита и приповерхностный слой белого цвета толщиной 5...30 мкм с ультрамелкими А–М кристаллами (наноструктурное состояние). Количественное их соотношение определяется температурой трения, нормальными и тангенциальными напряжениями, составом сплавов и другими факторами. Прочностные свойства, определяемые методом нанотвердости, этих областей различны. Так в приповерхностном слое твердость достигает максимальных значений, превышающих в 2...3 раза твердость исходной А-фазы.

Возникновение белых слоев при трении характерно и для других материалов. Например, в стали они возникают, но только при больших давлениях. В никелиде титана они образуются во всех исследуемых нами диапазонах  $v$  и  $q$ . Поэтому естественно предположить, что процесс изнашивания TiNi связан с периодическим разрушением этого слоя, удалением его в виде частиц и последующим нарастанием нового.

Проиллюстрируем состояние поверхностей трения фотографиями на рис. 6. На легких режимах работы поверхность однородная серого цвета со слабыми следами белого слоя (рис. 6 а). Общий вид дорожек трения в трехмерном изображении показан на этом же рисунке (цифрами указан размеры элементов). При увеличении  $v$  и  $q$  наблюдаются продольно поперечные растрескивания, сопровождающиеся появлением частиц износа и увеличением белого слоя. Вид дорожки трения такой



**Рис. 6.** Строение поверхности трения сплава  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$ . Фото слева – поверхность трения  $\times 200$ , фото справа – 3D изображение. а)  $v=0,52$  м/с,  $q=3,15$  МПа, б)  $v=1,02$  м/с,  $q=4,72$  МПа, в)  $v=0,52$  м/с,  $q=6,3$  МПа

же, как и в предыдущем случае. В обоих случаях адгезионное взаимодействие и схватывание не наблюдалось (рис. 6 а, б). Эти интервалы параметров трения характерны образованием мелкодисперсных чешуйчатых частиц износа (рис. 5).

На рис. 6 в показаны поверхности износа при больших значениях  $q$ . Видно, что процесс срезания материала идет со слабыми следами схватывания – поверхности гладкие, выглаженные. Наблюдаются остатки белого слоя на гребнях дорожек трения и отдельные следы вырывов (адгезионное изнашивание).

В целом, по этим результатам можно отметить несколько особенностей.

Адгезионное взаимодействие, имеющее место в любых трущихся парах, в TiNi мало. Это связано с тем, что адгезия заметна в материалах, где формирование поверхностного слоя идет дислокационным путем, сопровождается разрушением за счет схватывания и диффузионно-дислокационного механизма [6]. В нашем случае отсутствие следов схватывания свидетельствует о другом механизме изнашивания, в частности, как будет показано ниже, – за счет отделения тонких поверхностных слоев в результате механоциклирования.

Разрушение поверхностных слоев и отделение частиц происходит в различных скоростно-силовых зонах по разным механизмам. В первой и частично во второй зонах, где продукты износа имеют вид мелкоразмерных чешуек, износ идет по ме-

ханизму усталостного разрушения. Здесь силовое воздействие на поверхностные слои сопровождается циклической сменой сжимающих и растягивающих напряжений в микрорегионах контакта, приводящее к достижению предела усталости, и как следствие, – к разрушению микрообъемов. Предвестниками его являются накопление микроповреждений, образование концентраторов напряжений, зарождение микротрещин и слияние их в магистральную. Повышенная износостойкость TiNi объясняется тем, что в результате  $A \leftrightarrow M$  превращений поверхностные слои приобретают не только повышенную твердость, но и высокие пластичность и пластическую аккомодацию, приводящие к подавлению или затормаживанию образования предвестников и, соответственно, – к высокой усталостной прочности. Повышению ее способствует также упругая анизотропия кристаллов в поверхностных слоях. Например, коэффициент упругой анизотропии у TiNi в несколько раз ниже, чем у обычных материалов [9].

При высоких значениях  $v$  и  $q$  процесс разрушения вызывается, на наш взгляд, аномально высокой пластичностью металла в микрорегионах контакта, инициированной высокими давлениями и локальными температурами. Не исключено появление квазижидкого состояния. В этом случае процесс разрушения идет путем сдвига и среза поверхностных слоев единичными микронеровностями контртела или наслаивания на них срезан-

ных слоев по типу наростообразования при резании и последующего удаления продуктов износа из зоны контакта. Процесс разрушения реализуется в условиях малоциклового нагружения.

Следует указать, что влияние скоростей и давлений на разрушение различно при любых механизмах изнашивания (кроме хрупкого разрушения). Давление определяет уровень пластической деформации материала, в то время как повышение температуры приводит к частичному обратному М→А превращению, размягчению поверхностных слоев и облегчению деформации.

Понижение коэффициента трения при увеличении  $v$  и  $q$  (рис. 4) объясняется повышением прочности поверхностных слоев [10], а также малыми изменениями адгезионной и деформационной составляющих сил трения и уменьшением сдвигового сопротивления материала на поверхностях трения при возрастании сжимающей нагрузки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Понтер В.Э., Итин В.И., Монасевич Л.А., Паскаль Ю.И. и др. Эффекты памяти формы и их применение в медицине. – Новосибирск: Наука, 1992. – 742 с.
2. Хохлов В.А. Контактное взаимодействие и трение покоя никелида титана // Вестник Томского государственного университета (Бюллетень оперативной научной информации, № 32, апр. 2004). – 2005. – С. 101–108.
3. Гельтман И.С., Рогов Н.В., Паньков В.И. Износостойкость плазменных покрытий на основе металлических соединений системы титан-никель // Трение и износ. – 1985. – Т. 6. – № 1. – С. 167–170.
4. Куприянов И.Л., Шипко А.А., Наерман Я.М., Крепко Е.В. Исследование износостойкости рутиловых и никель-титановых газотермических покрытий // Трение и износ. – 1986. – Т. 7. – № 4. – С. 722–725.
5. Семида В.В., Полотай В.В., Сорокин С.М., Гончарук Н.В. Триботехнические свойства никелида титана при трении без смаз-

#### Заключение

Исследованы триботехнические свойства никелида титана нескольких составов, различающихся по температурам начала мартенситных превращений.

Получены зависимости весового износа, интенсивности изнашивания, температур и коэффициентов трения при варьировании скоростей скольжения и давлений. Показано, что износ никелида титана намного ниже износа классических материалов, таких как износостойкие чугуны, бронзы, сталь.

На основе исследования поверхностей изнашивания, продуктов износа и анализа указанных зависимостей выявлены механизмы изнашивания и условия их смены при переходе от одного скоростно-силового режима к другому.

Доказано, что износостойкость никелида титана обусловлена его высокой усталостной прочностью при механоциклировании с трением.

*Работа выполнена при финансовой поддержке по гос. контракту № 16.513.11.3121 от 12.11.2011 г.*

- ки // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 2. – С. 323–326.
6. Тарасов С.Ю. Исследование триботехнических свойств никелида титана // Перспективные материалы. – 1998. – № 5. – С. 24–30.
7. Perkins J. NiTi and NiTi<sub>x</sub> shape memory alloys // Metallurgy Forum. – 1981. – V. 3. – P. 153–163.
8. Хохлов В.А. Кинетическая нанотвердость и свойства пластически деформированного никелида титана // Современные проблемы машиностроения: Труды II Междунар. научно-техн. конф. – Томск, 2004. – С. 107–110.
9. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. – 216 с.
10. Любарский И.М., Палатник С.Л. Металлофизика трения. – М.: Металлургия, 1976. – 176 с.

*Поступила 29.02.2012 г.*