

УДК 669–1:539.621

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО ИЗНОСА МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Потекаев Александр Иванович,

д-р физ.-мат. наук, профессор, директор Сибирского физико-технического института им. акад. В.Д. Кузнецова при Томском Государственном университете, Россия, 634050, г. Томск, пл. Новособорная, д. 1. E-mail: potekaev@spti.tsu.ru

Хохлов Виктор Александрович,

канд. техн. наук, доцент кафедры механики деформируемого твердого тела физико-технического факультета Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: khokhlov@sibmail.com

Галсанов Солбон Владимирович,

аспирант кафедры механики деформируемого твердого тела физико-технического факультета Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: S_galsanov@sibmail.com

Шулепов Иван Анисимович,

канд. физ. мат. наук, ст. науч. сотр. лаборатории 22 Физико-технического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: shulepov@tpu.ru

Цель работы: рассмотреть поверхностное разрушение по усталостному механизму износа обычных металлов и никелида титана, привести сравнительные экспериментальные результаты, показывающие, что износостойкость никелида титана намного выше традиционных антифрикционных металлов. Раскрыть природу повышенной износостойкости никелида титана.

Методика и материалы: исследовались сплавы TiNi трех составов: $Ti_{50}Ni_{47.5}Fe_{2.5}$ (ТН-1К), $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$, $Ti_{49.9}Ni_{50.1}$. Работа выполнялась на машине трения СМТ-1. Исследование поверхностных слоев проводилось на микроскопе нанотвердомера «GSEM instruments» и на 3D профилографе-профилометре «Still».

Результаты: путем введения ряда условий, не нарушающих работоспособность реальных узлов трения, выделен усталостный износ, как основной вид изнашивания. Рассмотрены процессы образования частиц износа за счет образования подповерхностных трещин. Повышенная по сравнению с обычными материалами долговечность никелида титана доказана экспериментально.

Ключевые слова:

Никелид титана, память формы, трение, износ, износостойкость.

Введение

Никелид титана (TiNi) относится к классу материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ), особенностью которых является изменение фазового состава в условиях термического или силового воздействий. Эти изменения характеризуются прямыми и обратными мартенситными превращениями, в результате которых исходная аустенитная фаза (А) превращается частично или полностью в новую мартенситную фазу с образованием температурного мартенсита М или мартенсита деформации M_d . При снятии внешнего воздействия происходит частичное или полное обратное $M \rightarrow A$ или $M_d \rightarrow A$ превращения.

Опыт эксплуатации конструкций и технологической обработки изделий из никелида титана показал, что его износостойкость существенно выше, чем у обычных антифрикционных материалов и приближается или превышает по этому показателю высокоизносостойкие специальные сплавы и покрытия.

Ранее авторами в работе [1] затрагивалось это явление. В настоящей статье излагается более глу-

бокое его рассмотрение и анализ с позиций мартенситных превращений, контактной механики, механики разрушения, теории трения и износа, а также на базе имеющихся экспериментальных результатов.

Введем ряд условий трения никелида титана с целью выделить усталостный износ как основной, не переходя при этом границы наиболее распространенных эксплуатационных характеристик соединений.

- Никелид титана – материал коррозионностойкий, на нем образуются только адсорбированные слои, не вступающие в химическое взаимодействие с материалом. Наличие незначительного количества вторичных фаз ($TiNi_3$, Ti_3Ni) существенного влияния на хемосорбцию материала в целом не оказывает.
- Режимы работы таковы, что $h/R \leq 0,5$ (h – глубина внедрения единичной микронеровности в контртело, R – радиус при вершине этой неровности) исключают микрорезание и абразивное изнашивание.

- Выбираются наиболее предпочтительные с точки зрения эксплуатационных характеристик скоростные и силовые режимы малого и среднего уровней ($q=3...6$ МПа, $v=0,5...2,5$ м/с).
- Рассматривается сухое трение и учитывается только трение скольжения. Трение покоя и предварительное смещение не рассматриваются.
- Сдвигающие нагрузки τ прикладываются циклически, одного направления и амплитуды.

При этих условиях отсутствуют многие виды износа: микрорезание, коррозионно-механический, электро-механический, эрозионный, кавитационный, фреттинг-износ и др.

В результате остаются два вида разрушения – усталостный и адгезионный. Адгезионное изнашивание (схватывание) присутствует на любых площадках физического контакта, но доля его в общем износе относительно мала по сравнению с усталостным износом [1].

Материалы, методика и приборы

Исследовались сплавы TiNi трех составов: $Ti_{50}Ni_{47,5}Fe_{2,5}$ (ТН-1К), $Ti_{49,4}Ni_{50,6}$, $Ti_{49,9}Ni_{50,1}$.

Работа выполнялась на машине трения СМТ-1. Использовалась схема – неподвижная колодка (образец) – жесткий вращающийся диск (контртело). Образцы выполнялись в виде цилиндров диаметром 9 мм и высотой 10 мм. Термообработка сплавов TiNi проводилась в вакууме по режиму $T=850$ °С с выдержкой 1 час. Исследование поверхностных слоев проводилось на микроскопе нанотвердомера «GSEM instruments» и на 3D профилографе-профилометре «Still».

Усталостное разрушение классических материалов

Рассмотрим физическую картину усталостного разрушения материалов.

Усталостное поверхностное разрушение происходит путем отделения (отслаивания) материала с поверхности трущихся тел в виде тонких пластинок – чешуек. Для этого необходимо распространение подповерхностной магистральной горизонтальной трещины до ее пересечения с поверхностью или растущей от поверхности вглубь материала вертикальной трещины (рис. 1). Вопрос возникновения микротрещин (зародышевых) является наиболее трудным и малоизученным. Изнашивание в значительной степени определяется напряженно-деформированным состоянием (НДС) поверхностных слоев, возникающим при взаимодействии микронеровностей трущихся тел. Последние создаются или в результате предшествующей технологической обработки, или путем приработки при трении.

В пластичных материалах, таких как металлы, отслаивание происходит за счет слияния микротрещин (микропор), которые образуются на включениях за счет растягивающих напряжений в поверхностном слое, при многократном циклическом деформировании микронеровностями контртела, а также на дефектах кристаллического стро-

ения, исходных микропорах, во впадинах микровыступов дискретного контакта. Возникновение вертикальных трещин возможно за счет концентрации напряжений во впадинах микронеровностей и адгезионными вырывами. На рис. 1 схематично изображены расположения трещин.

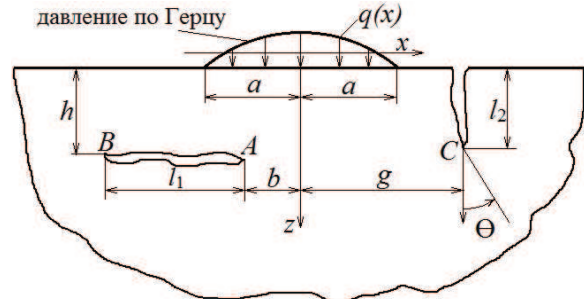


Рис. 1. Схема расположений горизонтальной и вертикальной трещин в полупространстве с перемещающейся на его поверхности герцевской площадкой

Если оба вида трещин сформированы, то можно отследить их распространение до локальных разрушений, т. е. отделения частиц – фрагментов износа. Такой анализ был сделан в работе [2], где были введены коэффициенты интенсивности напряжений K_1 и K_2 , соответственно, по нормальным и касательным напряжениям, возникающим на площадке герцевского контакта от нагрузок q и fq ($f=0,25$ коэффициент трения). На рис. 2 показано изменение этих коэффициентов в функции координат (h, a, l_1, l_2, q, b, g – рис. 1) расположения трещин относительно осей z и x . Знак «+» соответствует положительному перемещению микровыступа относительно z и x .

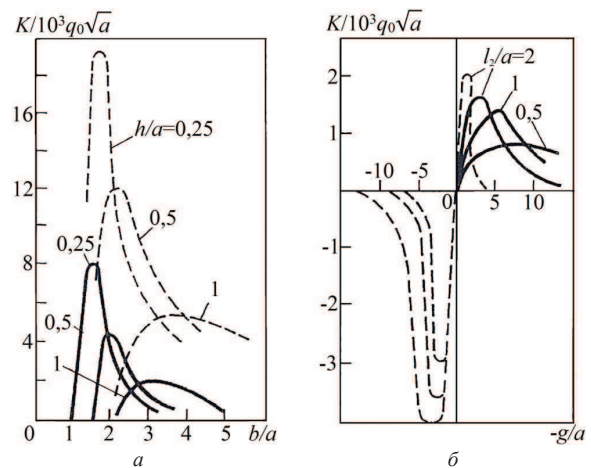


Рис. 2. Зависимость нормированных коэффициентов K_1 (сплошные кривые) и K_2 (штриховые кривые) от безразмерного расстояния между концом трещины и осью герцевской площадки: а) горизонтальная, б) вертикальная трещина

Из графиков (рис. 2, а) видно, что если микровыступ находится над трещиной ($g/a=1$), то она сжимается. При удалении герцевской площадки вправо (рис. 1) K_1 и K_2 возрастают, достигая максимума. Более длинным трещинам соответствует большие

K . Если $K > K_c$ (K_c – критическая длина трещины), то трещина будет расти до критической длины. Это неравенство показывает, что при неоднократных проходах длина трещины увеличивается.

Более сложный характер роста наблюдается у вертикальных трещин (рис. 2, б). Видно, что максимумы могут создаваться при нахождении микровыступа как справа, так и слева от трещины. Мало того, вертикальная трещина может сомкнуться на поверхности и остаться острой на глубине. Кроме того, эта трещина может отклоняться от вертикали с наибольшим углом отклонения $\Theta = -69^\circ$. Знак «–» показывает, что трещина разворачивается в сторону, противоположную движению микровыступа, и при возможном ветвлении такой трещины его микроразрушение может произойти при циклических однонаправленных проходах с образованием фрагмента.

В целом следует отметить, что рост трещин при циклических проходах приводит при определенной ее длине к отслаиванию материала и образованию частиц износа.

Если контактируют, например, микронеровность с упруго-пластическим полупространством, то впереди каждой микронеровности, находящейся в контакте движется пластическая волна [3]. На фронте ее напряжения сжимающие, за фронтом – растягивающие. Циклическое приложение сдвигающей нагрузки одного направления вызывает цикличность изменения этих напряжений. С увеличением сжимающих и сдвиговых нагрузок величина растягивающих напряжений растет. Разгрузка пластичных материалов начинается по поверхности на глубине в зоне действия максимальных касательных напряжений, а для хрупких материалов – на поверхности.

Из сказанного выше можно сделать следующий вывод. Усталостное разрушение инициируется пластическими деформациями поверхностных слоев при многократных циклических проходах за счет смены знака напряжений и образования подповерхностных или вертикальных магистральных трещин, которые при некотором числе циклов и критической нагрузке приводят к отслаиванию материала с образованием пластинок – чешуек износа. Для хрупких материалов отслаивание идет с поверхности, вид разрушения хрупкий, а частицы износа аналогичны частицам износа пластичных материалов, которые образуются из магистральной трещины, близко расположенной к поверхности.

Усталостное разрушение никелида титана при трении

Общее в усталостных разрушениях материалов с памятью формы и классических материалах состоит в процессах образования подповерхностных горизонтальных и вертикальных трещин в результате слияния микротрещин и микропор в магистральную, а также в пластических деформациях и в усталостном разрушении с образованием частиц износа в виде мелкодисперсных частиц.

Различие в износе обоих типов материалов заключается в структурно-фазовом состоянии (СФС) поверхностного слоя и в связи с этим – в особенностях пластического деформирования и образования зародышевых и магистральных трещин. Как было сказано выше, при силовом воздействии на TiNi (в нашем случае – это воздействия сжимающих и сдвигающих сил) проходят $A \leftrightarrow M_d$ превращения, связанные с нагружением, последующей разгрузкой и сменой знака напряжений, т. е. происходят последовательные прямые и обратные мартенситные превращения. Причем обе фазы, имеющие разные прочностные свойства, обладают повышенной пластичностью. Так, при трении в местах физического контакта возникают температурные всплески. Если значения местных температур превышают температуру начала образования M_d , то значение фазовых переходов не будет, но по окончании прохода контртела температура падает, деформации и напряжения остаются, и переход будет реализован. Таким образом, фазовое состояние и механические свойства поверхностей сложные, а структурное состояние определяется направлением сдвигающих сил, т. е. зерна фаз ориентированы вдоль линий действия τ .

Пластическая деформация сопровождается деформационным упрочнением – наклепом. Кроме того, на поверхностях трения образуются белые слои повышенной по сравнению с матрицей прочностью, но обладающие высокой пластичностью. На рис. 3 приведены фотографии изношенных поверхностей со следами белых слоев. На рис. 4 показано их распространение вглубь материала от дна канавки, образованной сферическим (рис. 4, а) и алмазным (коническим, рис. 4, б) инденторами. Толщина их и площадь зависят от давления q , скорости скольжения и состава сплава. При некоторых режимах трения слой может занимать всю поверхность трения. И следует предположить, что слой вносит немалый вклад в усталостный износ, поскольку он периодически удаляется в виде частиц износа и образуется вновь. С точки зрения СФС этот слой формируется в гидростатической зоне давлений и состоит из ультрамелкодисперсных (наноразмерных) мартенсита и остаточного аустенита.

Природа повышенной износостойкости никелида титана

Прежде всего, констатируем факт, что адгезионное изнашивание в никелиде титана обусловлено фазовыми превращениями с мартенситно-двойниковыми реакциями. Это обстоятельство указано для TiNi в работе [4] и подтверждено нами экспериментально [1]. В классических же материалах деформация и формирование поверхностного слоя пластических материалов идет дислокационным путем, и дальнейшее разрушение этого слоя происходит за счет диффузионно-вакансионного механизма.

Как указывалось выше, основной вклад в износ вносит усталость деформированных поверхност-

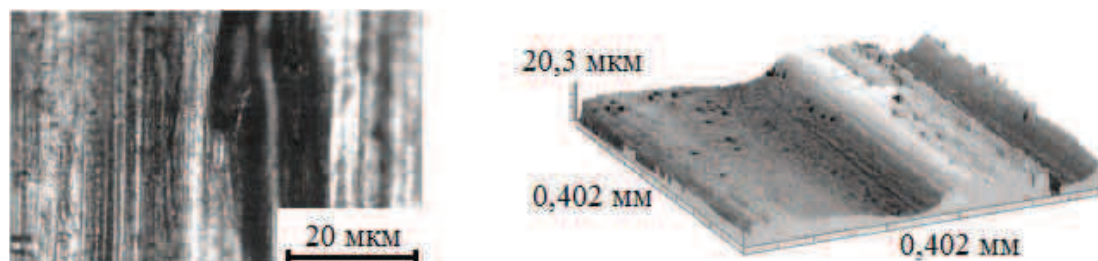


Рис. 3. Вид изношенных поверхностей со следами белых слоев

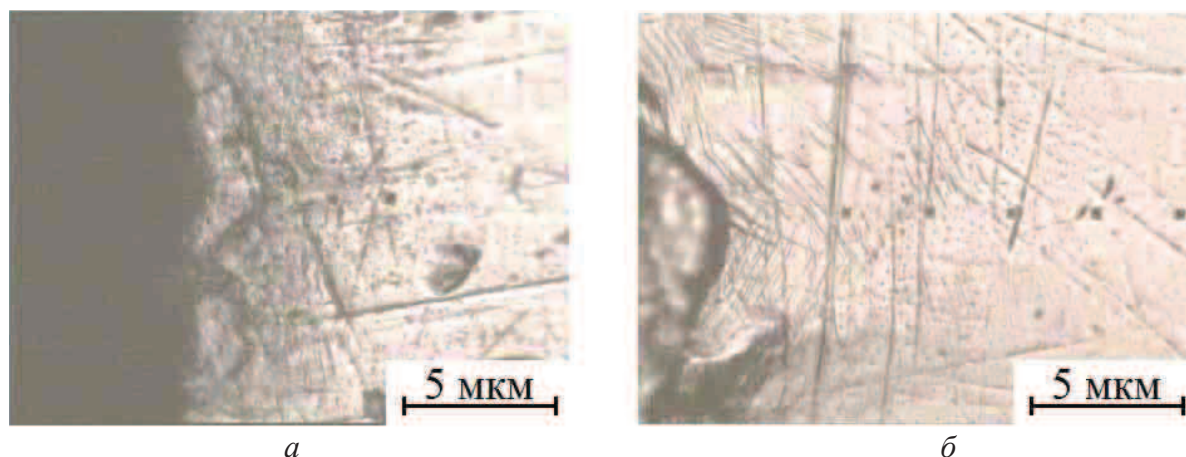


Рис. 4. Распространение белых слоев вглубь материала от дна канавки, образованных сферическим (а) и алмазным (б) инденторами

ных слоев. Износ за счет адгезионного схватывания второплановый, и пример его возникновения приведен на рис. 3, где черные точки – результат адгезионного вырывания.

В усталостном износе следует выделить два его вида: за счет циклической знакопеременной деформации слоя на фронте пластической волны, а также в области физического контакта с контртелом [3] и усталостное разрушение поверхностного слоя за счет периодического образования и разрыва адгезионных связей.

В обоих случаях механизм разрушения одинаков и схож с механизмом разрушения классических материалов.

Во втором виде усталостного износа образование адгезионных связей сопровождается сцеплением поверхностей. При действии сдвигающих нагрузок сцепленные поверхности деформируются, и если силы сцепления выше по величине сил когезионной связи менее прочного материала, то произойдет вырывание материала (рис. 3). Однако если силы адгезии по каким-либо причинам ослаблены (например, из-за наличия адсорбированных слоев, малости давления q на отдельных микровыступах и т. п.) и меньше когезионных сил, то произойдет простой разрыв адгезионных связей. Но при этом поверхности подвергаются растягивающе-сжимающим напряжениям. Циклическое приложение τ в этом случае вызывает циклические деформации одной из контактирующих поверхностей, возникновению микротрещин, магистральной трещины. Такой вид разрушения можно наз-

вать адгезионно-усталостным, и реализуется он без существенной пластической деформации.

Теперь обратимся к вопросу условий зарождения микротрещин в пластически деформированном поверхностном слое TiNi. Так как мартенситно-двойниковая структура не меняется от цикла к циклу [5], то в процессе механо- и термоциклирования материалов с $A \leftrightarrow M_d$ и $A \leftrightarrow M$ превращениями накопления микрповреждений различного рода, приводящих к образованию трещины и последующему разрушению, поэтому для материалов с ПФ характерна высокая долговечность и большой предел усталости даже при интенсивном циклическом воздействии по отношению к обычным материалам. Так, например, из работы [6] следует, что сплав CuAlNi (материал с ПФ) выдерживает $N=5 \cdot 10^4$ циклов при амплитуде деформации 2 %. Это на три порядка превышает долговечность меди при сопоставимых условиях. Следующий пример: никелид титана выдерживают $N=10^3$ циклов при амплитуде деформации 10 % [5], в то время как для металлов с дислокационной пластичностью те же циклы достигаются при амплитудах деформации всего 1 %.

Поскольку существует связь объемного и поверхностного разрушений, те же цифры можно отнести и к усталостному разрушению на поверхностях.

Анализ экспериментальных данных по малоцикловой усталости показывает, что долговечность материалов хорошо согласуется с законом Коффи-на–Мэнсона [7]: $N_f^{\beta} = c / \Delta E_p$, где N_f – число циклов

до разрушения; ΔE_p – пластическая деформация за цикл; β и c – постоянные. У сплавов с мартенситными превращениями постоянная β намного меньше, чем у других материалов. Так, например, у обычных металлов при комнатной температуре $\beta=0,5$, а у никелида титана $\beta=0,15-0,2$ [7].

Подобная повышенная усталостная прочность материалов с ПФ, в том числе и никелида титана, связана с тем, что при нагружении их доминирующими каналами деформации, как указывалось, являются геометрически обратимые мартенситные и двойниковые реакции [5]. Деформирование материала за счет движения обратимых носителей затормаживает образование концентраторов напряжений и, следовательно, – зарождение трещин.

Другим фактором, повышающим долговечность рассматриваемых сплавов, является их способность к пластической аккомодации, которая приводит к ослаблению трещинообразования при мартенситно-двойниковых реакциях.

Следующим фактором, влияющим на повышенную долговечность, является упругая анизотропия кристаллов, определяемая коэффициентом a . Так, например, у никелида титана $a=2$ и разрушение носит внутризеренный характер, а у бронзы

CuZnAl $a=15$ и разрушение идет путем межзеренного растрескивания, и долговечность ее намного ниже, чем у TiNi .

Заключение

Путем введения ряда условий, не нарушающих работоспособность реальных узлов трения, выделен усталостный износ, как основной вид изнашивания. Рассмотрены процессы образования частиц износа за счет образования подповерхностных трещин. Повышенная по сравнению с обычными материалами долговечность никелида титана доказана экспериментально и связывается с тремя факторами: в силу мартенситно-двойниковых реакций происходит торможение образования концентраторов напряжений и зарождения микротрещин и магистральной трещины, приводящих к поверхностному разрушению металла. Другими факторами, определяющими высокую усталостную прочность, является пластическая аккомодация, предотвращающая трещинообразования, а также низкая анизотропия кристаллов никелида титана, приводящая только к внутризеренному растрескиванию, в то время как у обычных материалов разрушение идет в худшем варианте – по границам зерен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование триботехнических свойств никелида титана / В.А. Хохлов, А.И. Потекаев, А.Н. Табаченко, С.В. Галсанов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 112–116.
2. Keer L.M., Brayant M.D., Haritos G.K. Subsurface and surface cracking due to Hertzian contact. Trans ASME Journal of Lubrication Technology. – 1982. – V. 104. – P. 347–351.
3. Пластические волны в никелиде титана при скольжении сферического индентора / А.И. Потекаев, В.А. Хохлов, С.В. Галсанов, А.Н. Табаченко, И.А. Шулепов // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 125–130.
4. Тарасов С.Ю. Исследование триботехнических свойств никелида титана // Перспективные материалы. – 1998. – № 5. – С. 24–30.
5. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. – Л.: ЛГУ, 1987. – 216 с.
6. Rachinger W.A. A «super-elastic» single crystal calibration bar // British Journal of Applied Physics. – 1958. – V. 9. – № 6. – P. 250–251.
7. Melton K.N., Mercier O. The effect of martensitic phase transformation on the low cycle fatigue behavior of polycrystalline Ni-Ti and Cu-Zn-Al alloys // Materials Science and Engineering. – 1979. – V. 40. – № 1. – P. 81–87.

Поступила 09.10.2013 г.

RESEARCH OF FATIGUE WEAR OF SHAPE MEMORY MATERIALS

Aleksandr I. Potekaev,

Dr. Sc., Siberian Physical Technical Institute named after academician
V.D. Kuznetsov, Russia, 634050, Tomsk, Novosobornaya square, 1.

E-mail: potekaev@spti.tsu.ru

Viktor A. Khokhlov,

Cand. Sc., Tomsk State University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 36. E-mail: khokhlov@sibmail.com

Solbon V. Galsanov,

Tomsk State University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 36. E-mail: S_galsanov@sibmail.com

Ivan A. Shulepov,

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: shulepov@tpu.ru

The main aim of the study is to consider the surface fracture on fatigue wear mechanism of conventional metals and NiTi, to introduce comparative experimental results which show that NiTi wear resistance is much higher than traditional anti-friction metal; to disclose the nature of increased wear resistance of NiTi.

Methods and materials: The authors have studied TiNi alloys of three compositions: $Ti_{50}Ni_{47.5}Fe_{2.5}$ (TH-1K), $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$, $Ti_{49.9}Ni_{50.1}$ on the friction machine SMT-1. The study was carried out on the surface layers on a microscope of the «GSEM instruments» nanohardness gage and on the 3D profilograph-profilometer «Still».

The results: The authors determined the fatigue wear as the main form of wear by introducing a number of conditions not disturbing the performance of real friction units. The paper considers wear particle formation due to formation of subsurface cracks. The increased durability of NiTi in comparison with conventional materials was proved experimentally.

Key words:

Titanium nickelide, shape memory, friction, wear, wear resistance.

REFERENCES

1. Khokhlov V.A., Potekaev A.I., Tabachenko A.N., Galsanov S.V. Issledovanie tribotekhnicheskikh svoystv nikelida titana [Investigation of tribological properties of NiTi]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 112–116.
2. Keer L.M., Brayant M.D., Haritos G.K. Subsurface and surface cracking due to Hertzian contact. *Trans ASME Journal of Lubrication Technology*, 1982, vol. 104, pp. 347–351.
3. Potekaev A.I., Khokhlov V.A., Galsanov S.V., Tabachenko A.N., Shulepov I.A. Plasticheskie volny v nikelide titana pri skolzhenii sfericheskogo indentora [Plastic waves in NiTi during sliding spherical indenter]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 125–130.
4. Tarasov S.Yu. Issledovanie tribotekhnicheskikh svoystv nikelida titana [Investigation of tribological properties of NiTi]. *Advanced materials*, 1998, no. 5, pp. 24–30.
5. Likhachev V.A., Kuzmin S.L., Kamentseva Z.P. *Effekt pamyati formy* [The shape memory effect]. Leningrad, LGU, 1987. 216 p.
6. Rachinger W.A. A «super-elastic» single crystal calibration bar. *British Journal of Applied Physics*, 1958, vol. 9, no. 6, pp. 250–251.
7. Melton K.N., Mercier O. The effect of martensitic phase transformation on the low cycle fatigue behavior of polycrystalline Ni-Ti and Cu-Zn-Al alloys. *Materials Science and Engineering*, 1979, vol. 40, no. 1, pp. 81–87.