

## Адгезионное разрушение материалов с памятью формы на основе никелида титана в условиях трения

Потекаев А.И.<sup>1,†</sup>, Хохлов В.А.<sup>2</sup>, Галсанов С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский физико-технический институт им. акад. В.Д. Кузнецова, пл. Ново-Соборная, д. 1, 634050 Томск

<sup>2</sup>Томский государственный университет, пр. Ленина 36, 634050 Томск

<sup>†</sup>Potekaev@spti.tsu.ru

## Adhesive fracture of TiNi-based shape memory materials under friction testing

A.I. Potekaev<sup>1</sup>, V.A. Khokhlov<sup>2</sup>, S.V. Galsanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Physical-Technical Institute. Acad. V.D. Kuznetsov's, pl. Novo-sobornaya, 1, 634050 Tomsk

<sup>2</sup>Tomsk State University, Lenin Avenue, 36, 634050 Tomsk

Рассмотрены условия возникновения адгезионного разрушения и его виды. Показано, что в условиях предварительного смещения разрушение происходит по адгезионно-усталостному механизму, а при скольжении с трением реализуется дополнительно и адгезионное вырывание материалов взаимодействующих тел в контакте.

**Ключевые слова:** адгезионное разрушение, никелид титана, трение, износ

The conditions of various types of adhesion fracture are investigated. It is shown that in a preliminary displacement fracture occurs by adhesive-fatigue mechanism, while during sliding with friction, in addition, the adhesive tearing of the bodies in contact is observed.

**Keywords:** adhesive fracture, titanium nickelide, friction, wear.

### 1. Введение

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

В данной работе изложен анализ вклада адгезионного разрушения, имеющего большое значение для ряда технических устройств с трением покоя и скольжения при использовании материалов с памятью формы (медицинские приборы, подвижно-неподвижные соединения и т.п.).

Под адгезионным взаимодействием понимаются все виды межатомных и межмолекулярных связей, возникающих между сближенными участками.

Адгезионный износ относится к одному из видов износа материалов и может называться по-разному:

схватывание, схватыванием с вырыванием и др. Тем не менее, под ним подразумевая срез, усталостное разрушение или вырывание материала за счет адгезионного сцепления и относительных тангенциальных сдвигов соприкасающихся тел. Изучение этого вида изнашивания проводилось, как правило, на продуктах износа, микрогеометрии изношенных поверхностей и их структурно-фазового состояния в режиме последствия по завершении процесса, т.е. изучались конечные результаты.

По своей сути процесс адгезионного разрушения сложный, многостадийный и многофакторный. Детально состояние адгезии рассмотрено в [1], в которой указано, что адгезия – это группа взаимодействий от простого схватывания чистых металлов и твердых поверхностей до разнообразнейших явлений их соединения. Это происходит в результате взаимодействия промежуточных слоев, содержащих интерметаллиды, твердые растворы, химические соединения или различные гетерогенные структуры.

Исходя из этих положений, рассмотрим реальный процесс адгезионного взаимодействия и адгезионного разрушения в контакте твердых тел, причем последний является функцией множества факторов. Многие из них были проанализированы ранее [2]. Воспользуемся

некоторыми из них, например, циклическостью, температурой, нагрузками, раскрывающих суть нашего понимания адгезионного взаимодействия и разрушения. Подтверждение этих представлений приведем в данной работе на стали, меди и сплавах с памятью формы на основе никелида титана ( $Ti_{50}Ni_{47,5}Fe_{2,5}$  – ТН-1К,  $TiNi_{50,8}$ ) при температурах 20°C, 300°C, в воздушной атмосфере. При этом значения сдвигающих сил подбирались из условия состояния трения покоя (предварительного смещения) или трения скольжения.

При возникновении физического (фактического) контакта и отсутствии промежуточных слоев и окисных пленок (соприкасаются ювенильные поверхности) предварительно активированные механической обработкой, предыдущими проходами контртела, бомбардировкой ионами или высокоэнергетическими частицами атомы поверхности вступают во взаимодействие с атомами контртела с образованием адгезионных связей – происходит сцепление или адгезионное схватывание поверхностных слоев. При достаточно большой выдержке в состоянии контакта, достаточной для реализации диффузии, прочность сцепления увеличивается. При относительном сдвиге в паре трения произойдет отрыв или срез частицы менее прочного материала. Если когезионная прочность последнего окажется выше прочности адгезионной связи, то разрушения не произойдет. В этом случае произойдет лишь упругая, упруго-пластическая или упруго-микрoplastическая деформации зоны сцепления. Следующий цикл сцепления вызовет ту же реакцию. Лишь после многократных акций «сцепление – разрыв» и по достижении усталостной прочности произойдет отделение фрагмента. Первые и последующие проходы инициируют (согласно классической механике разрушения) возникновение зародышевых трещин, их последующий рост и слияние в магистральную, приводящую к разрушению с образованием частицы износа.

Таким образом, имеем либо чисто адгезионный отрыв или срез поверхностного слоя, либо – усталостно-адгезионное разрушение, которое реализуется также за счет адгезионного взаимодействия. Налицо два противоборствующих процесса: когезионный, определяемый прочностными свойствами контактирующих тел, и адгезионное взаимодействие поверхностей. Если первый процесс определен однозначно, то второй зависит от множества факторов. Ранее было показано [2], что при повторных проходах за счет деформирования, удаления окисных пленок, активирования поверхностных слоев происходит усиление адгезионного сцепления. Наступающий после пиковых значений уровня адгезии некоторый ее спад связан с усилением деформационного упрочнения, снижающим сцепление. Выдержка предварительно деформированного контакта на воздухе в разгруженном состоянии приводит к снижению коэффициента трения, что объясняется снижением степени возбуждения активных центров путем адсорбции или хемосорбции, сопровождающейся ростом окисных пленок. Рост «локальных температур» в зонах физического контакта или повышение общей температуры контактной пары повышает пластические свойства, активизирует взаимодействие взаимодействующих поверхностей и, соответственно, повышает прочность сцепления, но

зато снижает когезионную прочность поверхностных слоев.

## 2. Адгезионное разрушение в условиях трения покоя (предварительного смещения)

Рассмотрим процесс адгезионного взаимодействия и разрушения на примере контакта двух микронеровностей шероховатых поверхностей, моделируя их сферическими сегментами. В основе предварительного смещения лежит образование кольца проскальзывания (микросмещение) в микрizonaх круговой площадки контакта под действием герцевских давлений  $q$  и внешних сдвигающих сил  $\tau$  [3]. Увеличение сдвигающих сил приводит к расширению кольца проскальзывания, развивающегося от периферии к центру площадки. Как только зона проскальзывания займет всю контактную область, так начнется относительное макроскольжение

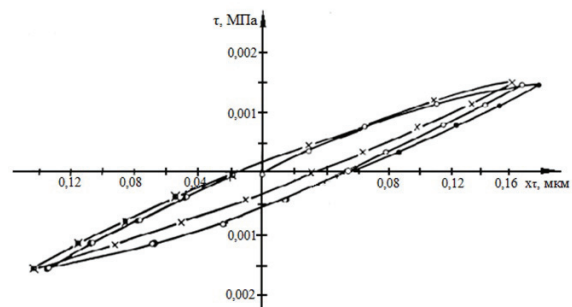


Рис.1. Процесс образования петли гистерезиса при знакопеременном сдвиге в сплавах ТН-1К. о - первый цикл нагружения; х - приработанный контакт.

тел, т.е. происходит переход от состояния трения покоя к трению скольжению.

Известно, что циклическое действие сдвигающих сил приводит к образованию петель гистерезиса на зависимостях «сила сдвига  $\tau$  – предварительное смещение  $x_\tau$ » (рис.1) [4].

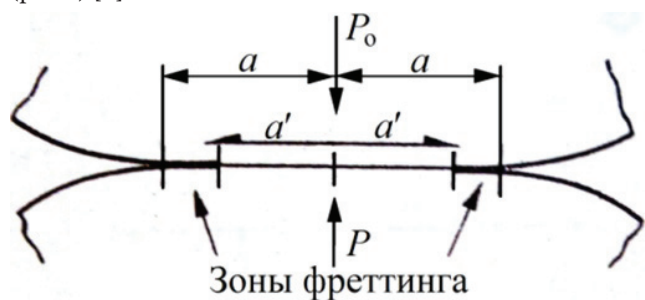


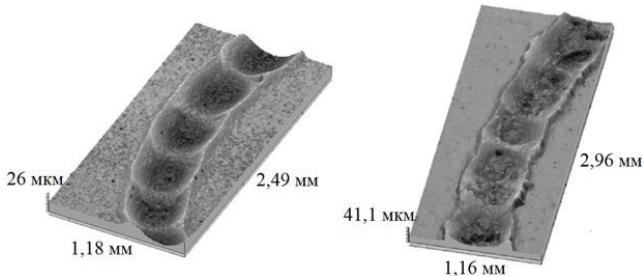
Рис.2. Влияние профилей контактирующих тел на наличие зон проскальзывания и фреттинга.

В [2] показано, что в основе образования петель лежит адгезионное взаимодействие (сцепление) контактирующих тел. В условиях предварительного смещения циклическое действие  $\tau$  приводит к усталостно-адгезионному механизму разрушения или к так называемому фреттинг-износу.

На рис.2 показано кольцо проскальзывания или область фреттинга. На рис.3 показано кольцо изнашивания герцевского контакта в пределах предварительного



**Рис.3.** Кольцевая зона проскальзывания и фреттинг при контакте стального шарика с плоской поверхностью.  $\alpha$  – угол между  $q$  и  $t$ .  $\alpha=90^\circ$ .

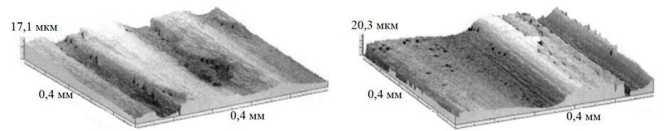


**Рис.4.** Вид поверхности трения: а) Cu,  $T=20$ ; б) Cu,  $T=300$ .

смещения при приложении осциллирующей сдвигающей силы [5]. Аналогичные результаты следует ожидать и в случае контакта поверхностей из никелида титана, так как этот материал качественно подчиняется законам контактной механики, механики разрушения и трения.

### 3.Адгезия и разрушение в условиях трения скольжения

Известный закон трения Амонтона – Кулона включает деформационно-механическую и адгезионно-молекулярную составляющие силы сопротивления скольжению (следовательно, и коэффициента трения), каждая из которых в силовых и тепловых полях может оказывать преобладающее влияние на процессы трения и изнашивания. В условиях сравнительно небольших давлений и отсутствия резания (или микрорезания) доминирующее влияние оказывает усталостное разрушение поверхностей и, как вторичный механизм, – адгезионное изнашивание [1, 2]. Если прикладывается малоцикловая нагрузка, то усталостное разрушение становится второстепенным. В нашем случае прикладывалась многоцикловая сдвигающая нагрузка. Поэтому выделить в чистом виде адгезионное разрушение сложно. Тогда будем рассматривать износ при совместном действии



**Рис.5.** Трехмерное изображение поверхностей трения для материала TiNi50.8. Скорость  $v=31,4$  м/мин, нагрузка  $P=300$  Н (а);  $v=62,8$  м/мин,  $P=600$  Н (б).

адгезионного и усталостного механизмов разрушения [6, 7]. Примерами этих механизмов могут служить проведенные опыты на меди, которые проводились на шариковом трибометре фирмы «Still».

На рис.4 а показан волнообразный процесс скольжения твердого сферического контртела по полупространству из меди при температуре  $20^\circ\text{C}$ , а на рис.4 б - при температуре  $300^\circ\text{C}$ . Несложно видеть, что пластифицирование при нагревании Cu активизирует адгезионные процессы – наблюдаются во множестве вырывы, которые отсутствуют на «холодной» меди.

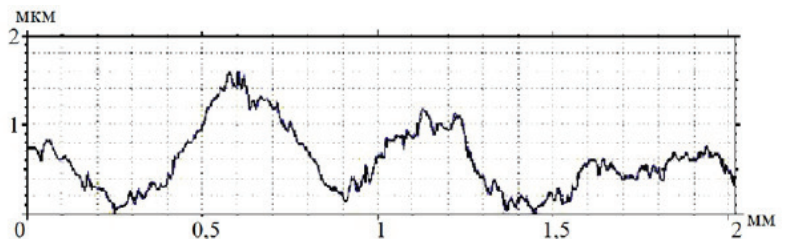
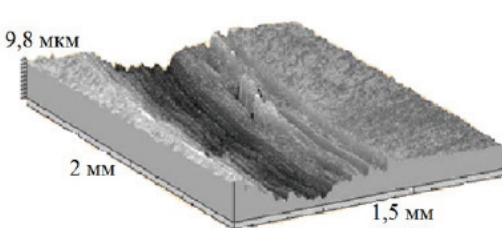
На рис.5 показано совместное действие усталостно-адгезионного механизма износа никелид титана. Черные точки – результат адгезионного вырывания. Результаты получены на машине трения СМТ-1.

На рис.6 а показана поверхность износа и продольная профилограмма этой поверхности (рис.6 б). Как видно из профилограммы, микрорельеф в волнах образовывается за счет адгезионного или адгезионно-усталостного разрушения микрообластей.

Необходимо обратить внимание на два важных обстоятельства, касающихся взаимодействия нержавеющей сталей и чистых металлов, работающих в обычной атмосфере и химически активных средах. Первый касается избирательности химического воздействия сред на отдельные компоненты сплавов. Так газовая среда может воздействовать на один из компонентов с образованием химических соединений, тем самым изменяя уровень адгезионного взаимодействия.

Например, компоненты воздуха могут взаимодействовать с никелем в интерметаллиде TiNi (или вторичными структурами  $\text{Ti}_2\text{Ni}$ ,  $\text{TiNi}_3$ , присутствующими в самом никелиде титана).

Следует отметить, что вклад адгезионного разрушения при наличии усталостного механизма незначителен в условиях многоциклового нагружения. Однако адгезия может оказать существенное влияние на разрушение в условиях контакта поверхностей, отсутствия окисных пленок, а также при повышенных температурах и малоцикловом нагружении.



**Рис.6.** Вид поверхности трения (а) и ее продольная профилограмма (б). ТН-1К.  $v=31,4$  м/мин,  $P=2$  Н.

### Заклучение

Рассмотрены два вида адгезионного разрушения: адгезионное вырывание и усталостно-адгезионное разрушение. В условиях трения покоя изнашивание происходит по усталостно-адгезионному механизму разрушения. Трение скольжения сопровождается износом по обоим видам разрушения, причем при совместной реализации усталостного и адгезионного механизмов разрушения последний вносит меньший вклад в износ.

### Литература

1. I.M. Lyubarskiy, S.L. Palatnik. Metal Physics friction friction. Moscow, Metallurgy 176 (1976) (in Russian) [Любарский И.М. Палатник С.Л. Металлофизика трения. М., Металлургия, 176 (1976)].
2. V.A. Khokhlov. Investigation of contact interaction of bodies and energy dissipation in the clutch. Dissertation on the candidate degree. Tomsk, 235(1975) (in Russian) [Хохлов В.А. Исследование контактного взаимодействия тел и рассеяния энергии в условиях сцепления. Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н., Томск, 235 (1975)]
3. Midlin R.D. Compliance of elastic bodies in contact. Journal of Applied Mechanic. Trans. Soc. Mech. Eng. **71**, 38-41 (1949).
4. V.A. Khokhlov, S.L. Katanukhina. Fundamental problems of mechanics. Khabarovsk, 64-66 (2003) (in Russian) [Хохлов В. А., Катанухина С.Л., Фундаментальные проблемы механики. Хабаровск, 64-66 (2003)].
5. K.L. Johnson. Mechanics of contact interaction. M: Mir, 414 (1989) (in Russian) [Джонсон К.Л. Механика контактного взаимодействия. М., Мир, 414 (1989)].
6. A.I. Potekaev, V.A. Khokhlov, S.V. Galsanov. The nature and mechanisms of abrasive wear of materials with shape memory for example NiTi. Izvestiya TPU, **321** (2), 108-112 (2012) (in Russian) [Потекаев А.И., Хохлов В.А., Галсанов С.В. Природа и механизмы абразивного изнашивания материалов с памятью формы на примере никелида титана. Известия Томского политехнического университета, **321** (2), 108-112 (2012)].
7. V.A. Khokhlov, A.I. Potekaev, S.V. Galsanov. The study of the tribological properties of nickel-titanium. Izvestiya TPU, **321** (2), 112-116 (2012) (in Russian) [Хохлов В.А., Потекаев А.И., Галсанов С.В. Исследование триботехнических свойств никелида титана. Известия Томского политехнического университета, **321** (2), 112-116 (2012)].