

*Работы выполнены при поддержке гранта Президента РФ (приказ №595 от 28 мая 2014 года), частично поддержаны грантом № 15-03-06528 Российского фонда фундаментальных исследований.*

### **Список литературы:**

1. R.J.Aitken, M.Q.Chaudhry, A.B.A.Boxall, M.Hull. Manufacture and use of nanomaterials: current status in the UK and global trends // Occupational Medicine: Oxford Journals | Medicine & Health. – 2006. – V. 56. – P.300–306.
2. D.M. Mitrano, A. Barber, A. Bednar, P. Westerhoff, C.P. Higgins, J.F.Ranville, Silver nanoparticle characterization using single particle ICP-MS (SP-ICP-MS) and asymmetrical flow field flow fractionation ICP-MS (AF4-ICP-MS) // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. – 2012. – V. 27. – P. 1131–1142.
3. D. Li, R.B. Kaner Shape and aggregation control of nanoparticles: not shaken, not stirred // Journal of the American Chemical Society. – 2006. – V. 128. – P.968–975.
4. S.K. Misraa, A. Dybowska, D. Berhanu, S.N. Luoma, E. Valsami-Jones. The complexity of nanoparticle dissolution and its importance in nanotoxicological studies // Science of The Total Environment. – 2012. – V. 438. – P. 225–232.
5. M. Hadioui, C. Peyrot, K.J. Wilkinson improvements to single particle ICPMS by the online coupling of ion exchange resins // Analytical Chemistry. – 2014 – V. 86. – P. 4668–4674.

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ПРИ ФРИКЦИОННОМ КОНТАКТЕ AL И FE**

*Н.М. Русин, к.т.н, с.н.с.,*

*А.Л. Скоренцев, технолог, инженер*

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021, г. Томск,  
просп. Академический, 2/4,*

*Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина,30,  
тел.(3822)-286-962*

E-mails: rusinnm@mail.ru; skoralexan@mail.ru

**Введение.** Алюминий является перспективным триботехническим материалом, поскольку обладает рядом полезных функциональных свойств. Однако номенклатура таких сплавов сильно ограничена [ГОСТ 14113-78] по причине склонности алюминия к схватыванию при сухом трении в паре со сталью. Как следствие, материал на участках схватывания вырывается из основы и переносится на сопряжённую поверхность, образуя там наросты. Большое их количество помимо ускоренного износа алюминиевого подшипника может привести к заеданию узла трения и поломке агрегата.

Однако согласно теории окислительного изнашивания [1], для любого склонного к окислению материала существует режим сухого трения с минимальной интенсивностью изнашивания, при котором скорость образования

оксидной плёнки не ниже скорости её разрушения. Алюминий активен по отношению к кислороду и в обычных условиях всегда покрыт оксидной плёнкой, следовательно, теория окислительного изнашивания может быть применена и к нему. Однако работ по исследованию триботехнических свойств алюминия в условиях сухого трения немного, поэтому целью настоящей работы является исследование формирующейся на сопряжённых поверхностях при сухом трении структуры и определение её связи с триботехническими характеристиками алюминия.

**Материалы и методика исследования.** Образцы из технически чистого алюминия имели размеры 3x3x8 мм. Их испытание на трение проводили в отсутствие смазки по схеме «палец-диск». Диск был изготовлен из закалённой малоуглеродистой стали марки Ст.45, имеющей твёрдость 47-49 единиц по шкале HRc. Использовался триботестер фирмы “Tribotechnic” (Франция), позволяющий измерять величину коэффициента трения в автоматическом режиме с заданной частотой. Для определения величины интенсивности изнашивания измеряли исходную и конечную высоту образца в мкм, и нормировали полученную разность на длину пути трения (м). Структуру и состав поверхностей трения изучали с помощью РЭМ марки LEO EVA 50 (ЦКП ИФПМ СО РАН) со встроенным микроанализатором.

**Результаты и их обсуждение.** Величину коэффициента трения определяли после прохождения образцом по стальному диску 150 м со скоростью 0.6 м/с. Как показали испытания (рис. 1 а), этого расстояния вполне достаточно для выхода на стационарный режим трения при малом давлении, не говоря уже об испытаниях при высоких давлениях. На рис. 1 б приведена зависимость величины коэффициента трения алюминия ( $\mu$ ) по сухой стали от давления, из которой следует, что максимальное его значение достигается при нагрузке около 9 Н ( $P \approx 1$  МПа) и при дальнейшем росте нагрузки снижается.

Из приведённого графика следует, что при сухом фрикционном взаимодействии алюминия и железа действуют как минимум два механизма трения. Один преобладает при низких нагрузках и способствует увеличению величины  $\mu$  с ростом давления на поверхности трения, другой действует при более высоких давлениях и вызывает снижение  $\mu$ . В любом случае величина коэффициента трения не остаётся постоянной при изменении нагрузки, как предсказывает закон Амонтона-Кулона.

В современной трибологии принято считать, что на величину  $\mu$  оказывают влияние механическое и адгезионное взаимодействие трущихся поверхностей:  $\mu = \mu_d + \mu_a$ . Первое слагаемое отражает потери на передеформирование поверхностных слоев материалов и важно для весьма шероховатых поверхностей и полимерных материалов, но для металлов с точностью до 1% деформационной составляющей  $\mu_d$  можно пренебречь. Прочность адгезионной связи в общем виде определяется выражением  $\tau = \tau_0 + \beta \cdot p_r$ , где  $p_r$  – фактическое давление в зонах контакта, а  $\tau_0$  и  $\beta$  – характеристики поверхностных слоев. Таким образом:  $\mu_a = \tau_0 / p_r + \beta$ , т.е. при малых давлениях коэффициент определяется величиной  $\tau_0$ , а при больших –  $\beta$ . При трении алюминия по сухой стали  $p_r = 230$  МПа,  $\tau_0 = 30$  МПа,  $\beta = 0.043$ , так что  $\mu_a = 0,124$  [2].

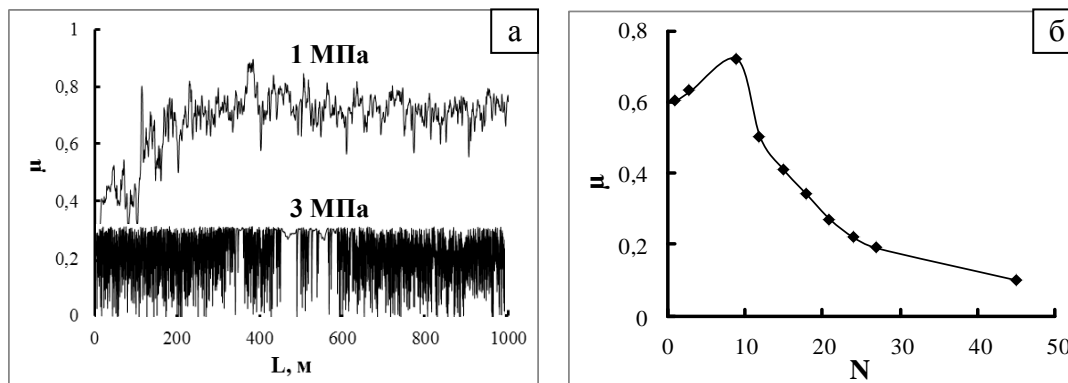


Рис. 1. Графики притирки (а) и изменения коэффициента сухого трения (б) Al по Fe.

Из рис. 1 а видно, что в начале испытаний при малой нагрузке коэффициент трения Al по стали действительно имеет низкое значение, однако по мере увеличения пути трения он растёт и достигает значения 0,72. Следовательно, в процессе трения свойства сопряжённых поверхностей контртел меняются.

На рис. 2 приведены фотографии поверхности трения алюминия, формирующиеся при малом (1 МПа) и большом (5 МПа) давлении. В первом случае поверхность трения содержит много изношенных участков, которые, по сути, не несут нагрузку, так как их дно расположено ниже плоскости контакта контртел. При более высоком давлении таких изношенных участков на поверхности трения гораздо меньше.

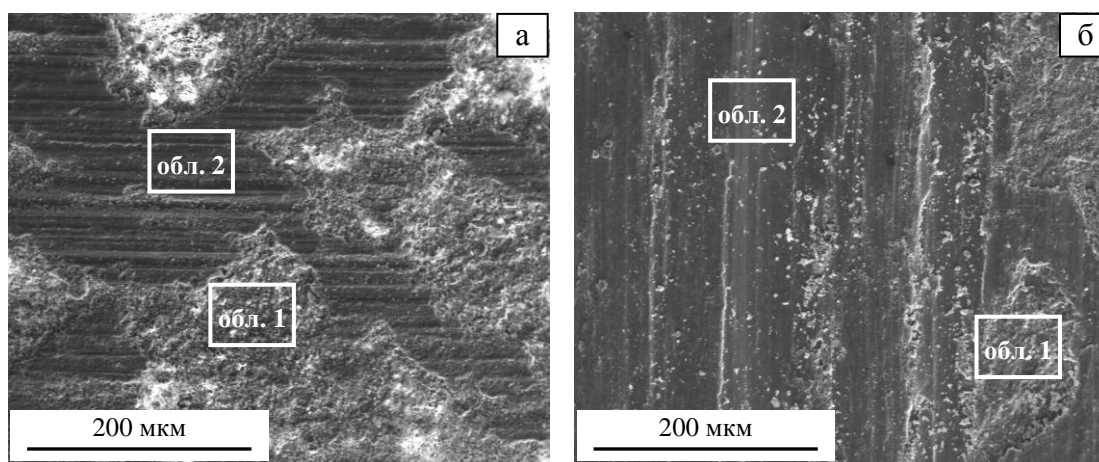


Рис. 2. Поверхности трения алюминия при давлении 1 (а) и 5 МПа (б).

Поверхность не разрушенных участков покрыта царапинами. Следовательно, при сухом трении алюминия по стальному диску имеет место и его абразивное изнашивание. При давлении 1 МПа царапины узкие и часто расположены, но становятся значительно шире и более пологими берегами при более высокой нагрузке. В основном царапины образованы не путём вдавливания и снятия микростружки твёрдыми расположенными на поверхности контртела выступами, а путём оттеснения ими материала при скольжении. Поскольку образец движется по круговой траектории, то периодичность канавок указывает, что выступы не могут быть следами механической обработки стального диска.

Из таблицы 1 видно, что поверхность алюминия при сухом трении содержит очень большое количество кислорода. Это указывает на наличие толстого поверхностного слоя с оксидами. Твёрдость оксидов алюминия выше, чем твёрдость стального диска, поэтому они также карябают его поверхность. Об этом свидетельствует присутствие железа на поверхности алюминия (табл. 1).

Таблица 1. Элементный состав разрушенных (обл.1) и гладких (обл.2) областей (рис.2) на поверхности трения Al при различном давлении.

| Состав, ат.% | 1 МПа  |        | 3 МПа  |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
|              | обл. 1 | обл. 2 | обл. 1 | обл. 2 |
| O            | 55±5   | 45±2   | 50±2   | 43±2   |
| Fe           | 12±1   | 5±1    | 11±1   | 3±2    |
| Al           | ост.   | ост.   | ост.   | ост.   |

На рис. 3 представлены изображения поверхности дорожек трения на стальном диске, образовавшиеся при давлении 1 и 3 МПа. Видно, что на поверхности трения образуются наросты, которых в первом случае меньше, а их размеры не столь велики, как при более высоком давлении.

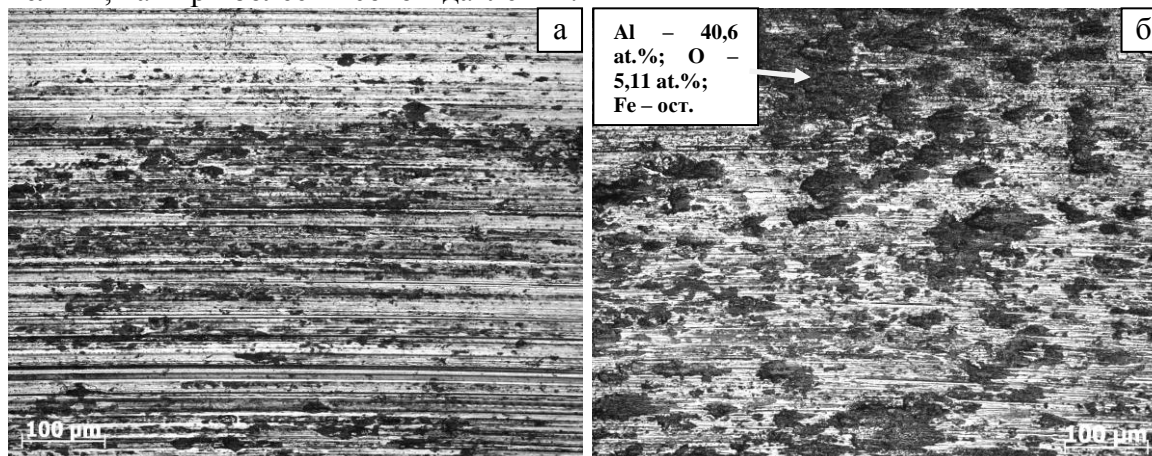


Рис. 3. Поверхность дорожек трения, образовавшихся при давлении 1 (а) и 3 МПа (б).

Одновременно, на дорожке трения также образуются и царапины, которые на стальном диске оставляют частицы, образовавшиеся вследствие разрушения поверхности трения алюминиевых образцов. Царапины более многочисленные и глубокие при малом давлении, когда наростов мало. То есть, последние служат своеобразной защитой поверхности контртела от абразивного воздействия частиц износа. Однако при этом усиливается также интенсивность их воздействия на поверхность Al, что способствует возрастанию изнашивания образцов от 0.1 до 0.8 мкм/м с ростом давления от 1 до 5 МПа [3].

**Заключение.** Из проделанной работы следует, что при сухом трении чистого алюминия по железу на стадии притирки на стальном образце образуются наросты, которые фактически замещают тип контакта “Al-Fe” на “Al-Al”, и особенности их эволюции определяют функциональные свойства алюминия.

Наросты вдавливаются в поверхность алюминия и деформируют её тем интенсивнее, чем выше приложенная нагрузка. Соответственно, интенсивность изнашивания алюминия растёт. Площадь, занимаемая наростами, также растёт с

повышением давления трения. Поверхность наростов сильно окислена, и схватывание их с алюминиевым образцом минимально, поэтому при увеличении площади наростов с ростом давления величина коэффициента трения снижается.

Экранирующее свойство наростов приводит к тому, что на стадии притирки образцов преобладающее влияние на величину  $\mu$  оказывает схватывание, сопровождающееся адгезионным износом. Однако если приложенное давление высоко, то по мере увеличения числа и площади наростов и окисления их поверхности адгезионное изнашивание образцов сменяется усталостным изнашиванием.

*Работа подготовлена в рамках выполнения программы СО РАН № III.23.2.4*

### **Список литературы:**

1. Костецкий Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин. – М., К.: Машгиз, 1959. – 479 с.
2. Буше Н.А. и др. Подшипники из алюминиевых сплавов. – М.: Транспорт, 1974. – 256 с.
3. Русин Н.М., Скоренцев А.Л., Коростелева Е.Н. Исследование влияния структуры на триботехнические свойства самосмазывающихся материалов на примере композитов Al-Sn // Изв. вузов. Физика. – 2013. – № 7/2. – С. 321–327.

### **К ПРОБЛЕМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ КРЕМНЕЗЕМА**

*А.В. Амосов, аспирант,  
Н.В. Макарова, к.т.н., с.н.с.,  
Е.А. Чусовитин, к.ф.-м.н., н.с.,  
А.В. Непомнящий, инженер*

*Институт автоматизи и процессов управления ДВО РАН, г.Владивосток, ул.Радио 5  
тел.(423)-231-04-39*

*E-mail: amosov.andrei@mail.ru*

Разработанные уникальные технологии позволяют получать нанодисперсный кремнезем из природных термальных растворов полуострова Камчатка, как в виде водного золя, так и порошка. Первые исследования показали эффективность использования данного продукта в качестве добавки в композиционные материалы [1,2]. Наиболее результативный эффект использования такого минерального высокодисперсного компонента достигается за счет заполнения существенной части свободного объема микроструктуры. Таким образом, определение формы и размеры частиц микро- и нанокремнезема является не только научной, но и актуальной технологической задачей в процессе проектирования состава и контроля качества композиционных материалов.