

И. В. КРАГЕЛЬСКИЙ, Н. М. МИХИН, Н. К. МЫШКИН, М. А. БРОНОВЕЦ,
М. Н. ДОБЫЧИН, В. Н. ДУБНЯКОВ, В. Н. ЛИТВИНОВ

НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ПРИ ТРЕНИИ И ЕЕ МЕХАНИЗМ

(Представлено академиком А. Ю. Ишлинским 20 XI 1974)

В некоторых случаях при трении твердых тел в условиях граничной смазки в результате влияния среды на фрикционное взаимодействие в зонах касания, например, у пары трения медь — сталь или медный сплав — сталь наблюдается образование медной пленки на поверхности стального образца. В этих условиях значительно уменьшается износ и коэффициент трения. Как известно, обнаруженное явление получило название избирательного переноса (и.п.).

Проведенные нами эксперименты и учет выполненных ранее исследований позволил предложить следующую модель и.п. Следует различать две стадии процесса: начальную стадию и установившийся режим. В начальной стадии под действием приложенной сжимающей нагрузки происходит внедрение более жестких неровностей стального образца в поверхность медного образца. Возникающие при этом напряжения на фактических контактах достаточно велики и приводят к появлению пластических деформаций на контакте. Относительное скольжение контактирующих тел сопровождается интенсивным деформированием и передеформированием тонкого (сравнимого с величиной внедрения), поверхностного слоя меди. Это будет приводить к усталостному утомлению этого слоя и появлению частиц износа.

Одновременно протекают трибохимические процессы, приводящие к образованию ⁽¹⁾ поверхностно-активных веществ (п.а.в.). Эти вещества, согласно П. А. Ребиндеру ^(2, 3), значительно интенсифицируют усталостное изнашивание (диспергирование) тончайшего поверхностного слоя меди (медного сплава) и снижают силу (силу трения), необходимую для диспергирования. На этой же стадии начинается избирательное растворение медного сплава за счет различных потенциалов, возникших у компонентов сплава при погружении его в электролит. Процесс механически активируется, поэтому наиболее интенсивно протекает на тех участках поверхности, которые подвергаются деформациям.

В случае чистой меди избирательное растворение имеет механо-химическую природу и возникает в результате неоднородности напряжений в поверхностном слое. Наряду с этим в смазке (глицерине) происходят окислительно-восстановительные процессы. В результате всех протекающих процессов образующиеся частицы выходят в смазку, в которой их поверхность активируется за счет указанных выше процессов, а также избирательного растворения легирующих элементов медных сплавов в глицерине. Размер образующихся частиц износа изменяется от нескольких сот ангстрем до нескольких микрон. На диспергированные частицы действуют электростатические силы, обусловленные электрокинетическими и контактно-электризационными явлениями, силы межмолекулярных взаимодействий и силы, обусловленные тепловым движением молекул смазки. Следует отметить, что «потенциальные ямы» для этих частиц будут находиться у поверхности раздела металл — смазка ⁽⁴⁾. Вследствие этого на

поверхности раздела может идти формирование пленки из коллоидных частиц, как отмечено в (5). Образующаяся при этом пленка будет пористой, с порами, заполненными смазкой. Исходя из этого, становится вполне объяснимым эффект «выпотевания» глицерина из пленки, обнаруженный А. А. Поляковым (5). Следует отметить, что в образовавшемся слое идут реакции полимеризации, и образуется «третье тело», обладающее высокими смазочными способностями (6). Это приводит к тому, что на начальной стадии и.п. коэффициент трения значительно уменьшается и достигает весьма малых значений.

Что переносится при трении медного сплава со сталью: чистая медь или сплав? Это зависит, очевидно, от соотношения скоростей поверхностного диспергирования, с одной стороны, и избирательного растворения — с другой. В наших экспериментах в начальной стадии и.п. переносился сплав. В дальнейшем в результате избирательного растворения легирующих элементов пленка обогащается медью, при этом тонкие приповерхностные слои могут состоять из чистой меди, а нижележащие — из медного сплава.

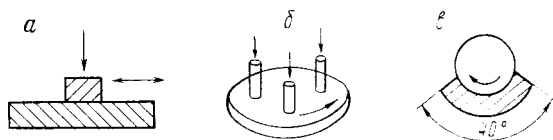
В установившемся режиме и.п. обе поверхности покрыты пленкой меди зернистой структуры. Из-за одинаковой природы поверхностей трения уже не будет преимущественного направления движения частиц от одной поверхности к другой. При этом коэффициент трения и интенсивность износа очень малы.

Для проверки предполагаемой гипотезы нами проведены комплексные исследования, которые включали в себя испытания на трение в среде глицерина, оптические исследования смазки, спектральный анализ пленки и исходных поверхностей. В испытаниях использовались контрообразцы, изготовленные из стали 45, и образцы из латуни Л63 и бронзы БрАЖ9-4 и БрОЦС5-6-5. Эксперименты проводились на трех машинах трения (см. табл. 1).

Таблица 1

Вид движения	Схема узла трения	Параметры процесса		Материалы образцов
		v , м/сек	P_a , кг/см ²	
Возвратнопоступательное	<i>a</i>	0,1	100	БрАЖ9-4 Л63
Вращательное	<i>b</i>	0,2	100	БрАЖ9-4 Л63
Вращательное	<i>c</i>	2,1	10	БрОЦС5-6-5

Примечание. 1) Во всех случаях в качестве смазки использован глицерин марки «Ч». 2) Схема узла трения:



Для изучения структуры и химического состава пленки по ее толщине по схемам *a* и *b* контрообразцы выполняли в виде пакетов пластинок, стянутых проходящими внутри их болтами. Рабочие поверхности таких контрообразцов шлифовали в сборе. После образования пленки в процессе трения контрообразцы разбирали на отдельные пластинки, на каждой из которых был слой перенесенного металла. Таким образом, получали возможность исследовать структуру и химический состав рабочей поверхности пленки и изучить ее в сечении, перпендикулярном поверхности трения. Каждая пара подвергалась испытанию в течение 10 и 50 час. непрерыв-

ной работы. Периодически регистрировали силу трения и в этот же момент, без остановки машины, отбирали пробу смазки.

Установлено, что коэффициент трения с течением времени во всех случаях испытаний уменьшается, достигая стабильного значения на всех типах машин трения в первые часы работы. Визуально в это же время обнаруживается пленка перенесенного металла.

При помощи оптического микроскопа в смазке удалось обнаружить (рис. 1) частицы износа размером от десятых долей микрона до нескольких микрон. Частицы износа появляются в смазке уже в первые минуты работы пары, когда коэффициент трения еще не достиг установившегося значения и на поверхности стального образца не образовалась перенесенная металлическая пленка. Последующий спектральный анализ частиц показал, что в них значительно содержание легирующих элементов сплава. Таким образом установлено, что в глицерине уже через несколько минут с начала работы появляются частицы износа, состоящие из материала образца (рис. 1, 2, см. вкл. к стр. 76).

Следующим этапом исследований было установление структуры и химического состава пленки, возникшей в процессе трения на поверхностях образцов. Для этого на микрорентгеноспектральном анализаторе Камека были проведены исследования поверхности трения пленки и ее сечения.

На рис. 1 приведена фотография поперечного сечения пленки (в поглощенных электронах) на поверхности стального образца при трении стали 45 и бронзы БрАЖ-9-4 в среде глицерина. Четко видна граница между пленкой и подложкой. Для исключения влияния микро топографии поверхностного слоя сечения, перенесенной металлической пленки, пленку вместе со стальной подложкой полировали на батиате. Проведенные исследования подтвердили зернистую структуру пленки (⁵).

Для оценки влияния продолжительности работы на химический состав пленки исследовали стальные образцы после 10 и 50 час. работы в паре с латунью Л63. Фотографии поверхностей трения стальных образцов с пленкой, полученные на микроанализаторе, приведены на рис. 2.

Количественный химический анализ показал, что пленка после 10 час. работы состоит из сплава меди с цинком, причем содержание цинка 12% (ср.: 35% в исходной латуни Л63).

Таким образом, выдвинутое положение об усталостном износе поверхностного слоя медного сплава, переносе в виде коллоидных частиц на поверхности трущихся образцов и образование пористой пленки (причем, как показал анализ, пленка образуется только на площади трения) получает экспериментальное подтверждение. Коэффициент трения в этом случае (10 час. после начала работы) уже достигает установившегося весьма малого значения ($f=0,004$), т. е. эффективное смазочное действие не обязательно обуславливается наличием на поверхности образца пленки из чистой меди.

На рис. 2в приводится снимок участка поверхности ст. 45 после 50 час. работы с Л63. В CuK_{α} -излучении видно распределение меди на том же участке поверхности стали. При фотографировании в ZnK_{α} -излучении цинк в пленке не обнаружен (снимок не приводится).

Таким образом, по мере увеличения продолжительности работы пары в среде глицерина в результате избирательного растворения цинка с поверхности пленки последняя обогащается медью и после 50 час. работы поверхностные слои пленки состоят только из меди. Эти слои создают условия для выполнения принципа положительного градиента при внешнем трении (⁷) и обеспечивают дальнейшую работу пары с минимальным износом и коэффициентом трения в установившемся режиме.

Предлагаемый механизм начальной стадии избирательного переноса нуждается в дальнейшем развитии и углублении. Однако и сейчас, пользуясь его, можно объяснить смазочное действие металлоплакирующих

смазок, в которых предварительно внесенные частицы меди или медного сплава создают эффект, аналогичный действию частиц износа в глицерине при избирательном переносе, приводя к образованию на поверхности стальных деталей пористых насыщенных смазкой слоев, обеспечивающих малый коэффициент трения и минимальный износ.

Институт проблем механики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
12 XI 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. М. Михин, Ю. С. Симаков, О физико-химических процессах при избирательном переносе, Сб. Физико-химическая механика контактного взаимодействия, Киев, 1973. ² П. А. Ребиндер, Н. Н. Петрова, Физико-химические основы явлений износа трущихся поверхностей и смазки при высоких давлениях. Тр. I Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, т. 1, М.—Л., Изд. АН СССР, 1939. ³ П. А. Ребиндер, Г. И. Епифанов, Влияние поверхностно-активной среды на трение и износ, Сб. Развитие теории трения и изнашивания, М., Изд. АН СССР, 1957. ⁴ О. Г. Усъяров, М. В. Серебровская, Закономерности коагуляции лиофобных дисперсных систем на далеких расстояниях при произвольных потенциалах поверхности, Сб. Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах, М., «Наука», 1972. ⁵ Л. Н. Гаркунов, И. В. Крагельский, А. А. Поляков, Избирательный перенос в узлах трения, М., «Транспорт», 1969. ⁶ А. А. Поляков, Полимеризация на контакте в процессе трения. Тезисы докладов Одесской конференции «Электрохимические процессы при трении и использование их для борьбы с износом», Одесса, 1973. ⁷ И. В. Крагельский, Трение и износ, М., «Машиностроение», 1968.