

СУСЛОВ В. И.,
кандидат технических наук;
ИЩЕНКО А. Ф.,
инженер

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПАР ТРЕНИЯ

Как известно, процессы трения и износа весьма сложны. Вскрывая эти закономерности, мы приближаемся к пониманию явлений, происходящих в действующих парах трения. Ниже приводятся некоторые данные по исследованию процесса трения и износа электролитических хрома и никеля из четырех ванн, которые получены путем опытов на машине трения МИ в диапазоне пяти нагрузок [3].

Для никелевых покрытий из ванн 11, 10 и 3 в процессе трения наблюдается повышение твердости, что связано с наклепом в поверхностном слое. Видимо, по толщине для различных нагрузок она разная, но эта разница не может быть уловлена на ПМТ-3.

При испытании букс под нагрузкой 43,3; 71,2; 99,0 и 126,6 кг/см² с исходного состояния изменение микротвердости вплоть до установления максимальной укладывалось во времени 90 ÷ 120 мин. Чем больше давление на буксу, тем меньше промежуток времени до установления в поверхностном слое максимальной микротвердости. Видимо, такой слой с повышенной микротвердостью имеется у хромового и никелевого покрытий из ванны 30. Его толщина еще меньше, чем у никелевых покрытий из ванн 11, 10 и 3.

На рис. 1 и 2 приведены фотографии микроструктуры электролитических хрома и никеля из ванны 30 при увеличении 600. Для хрома характерна мелкозернистая структура с размером зерен 2,5 ÷ 6 мк. Никель из ванны 30 имеет менее однородную более крупнозернистую структуру, чем хромовая с размером зерен 14 ÷ 28 мк. Состав травителя: 50 г соляной кислоты HCl, 50 г дистиллированной воды H₂O, 4 г сернистой меди CuSO₄ · 5H₂O.

Поверхности трения после взаимной приработки становятся ровными и видимых нарушений в металлографический микроскоп не наблюдается. Отмечено, что при хорошем состоянии поверхностей трения и даже при весьма длительных исследованиях, когда практически износ, температура буксы, работа и момент трения остаются постоянными, наблюдаются небольшие колеба-

ния момента трения. Величины колебаний зависят от пар трения так же, как и величина износа, работы и момента трения и температуры. Для выяснения этого явления мы решили произвести исследование поверхностей трения на электронном микроскопе, имеющем ряд преимуществ по сравнению с оптическим.

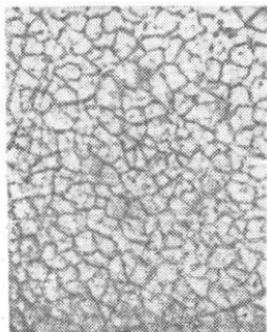


Рис. 1. Фотография микроструктуры электролитического хрома.

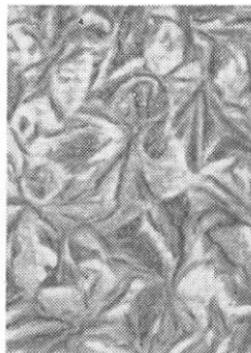


Рис 2. Фотография микроструктуры электролитического никеля из ванны 30.

В процессе взаимной приработки, когда чистота поверхностей трения отличается от оптимальной, колебания момента трения имеют место и они более отчетливые, чем при оптимальной чистоте поверхностей трения. В процессе приработки на сопряженных деталях в ряде случаев можно наблюдать наличие рисок, которые отчетливо видны и располагаются по направлению взаимной приработки.

На рис. 3 приводятся фотографии, полученные на электронном микроскопе УЭМВ-100 при увеличении в 13000 без приготовления шлифа:

а) хромовое покрытие при нагрузке $154,4 \text{ кг/см}^2$; длительность испытания 5 млн. оборотов нижнего ролика; следы рисок заметны по направлению движения;

б) никелевое покрытие из ванны 30 при нагрузке $154,4 \text{ кг/см}^2$; длительность испытания 6 млн. оборотов нижнего ролика. Здесь более отчетливо видны риски по направлению трения;

в) никелевое покрытие из ванны 30 при нагрузке $99,0 \text{ кг/см}^2$. Длительность испытания 600 тыс. оборотов нижнего ролика. Здесь видны риски более глубокие, образовавшиеся в процессе первоначальной приработки;

г) никелевое покрытие из ванны 11 при нагрузке $154,4 \text{ кг/см}^2$. Длительность испытания 4 млн. оборотов нижнего ролика. Здесь в отдельных местах еле заметны риски, а в некоторых местах явно видны глубокие риски по направлению трения;

д) никелевое покрытие из ванны 3 при нагрузке $154,4 \text{ кг/см}^2$. Длительность испытания 5 млн. оборотов нижнего ролика. В отдельных местах еле заметные следы рисок. Редко наблюдаются более глубокие риски;

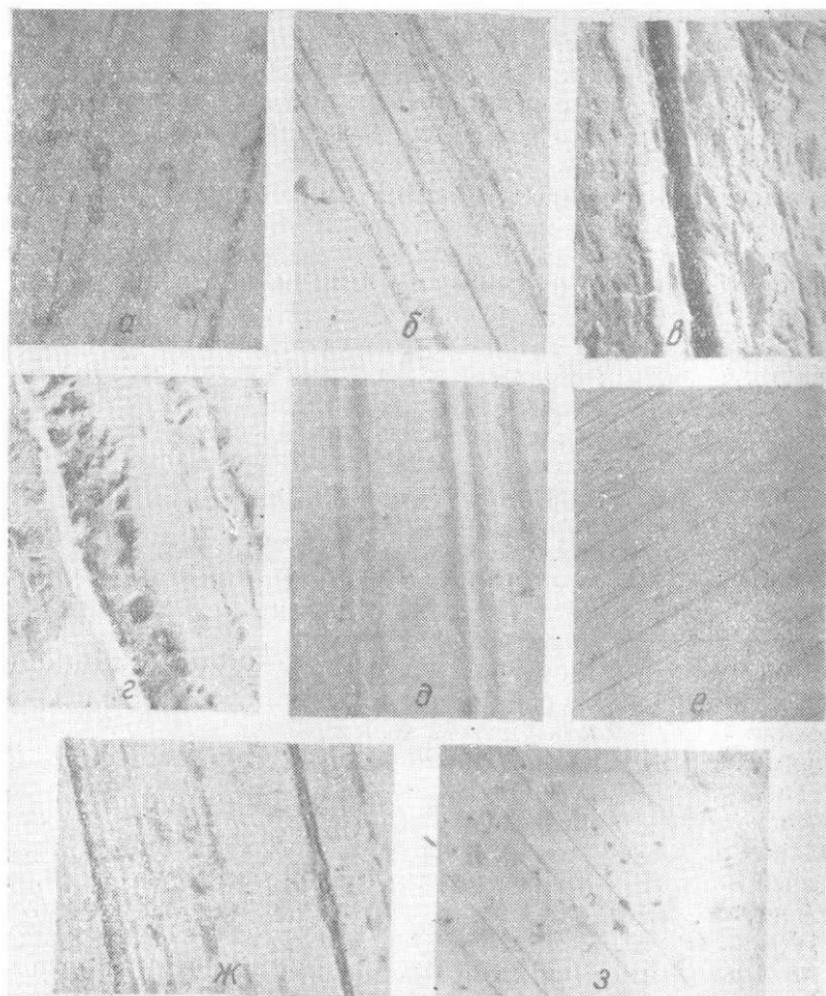


Рис. 3. Снимки поверхностей трения на электронном микроскопе без предварительного травления.

е) никелевое покрытие из ванны 3 при нагрузке 99 кг/см^2 при длительности испытания 600 тыс. оборотов нижнего ролика. Следы рисок еле заметны;

ж) никелевое покрытие из ванны 10 при нагрузке $71,2 \text{ кг/см}^2$

при длительности испытания 600 тыс. оборотов нижнего ролика. Явно видны риски, следы первоначальной приработки;

з) поверхность ролика из закаленного чугуна, работавшего в паре с буксой, покрытой никелем из ванны 30, при нагрузке $154,4 \text{ кг/см}^2$. В отдельных местах еле заметны риски.

Рассмотрение микрофотографий, полученных на электронном микроскопе (см. рис. 3), показывает, что поверхности трения имеют повреждения в виде рисок и различных углублений, хотя пары и работали при оптимальных условиях трения. Они образовались в результате наростообразования как в процессе приработки, так и у приработанных пар трения. Наличие их подтверждает, что процессу трения сопутствует наростообразование, которое оказывает влияние на процессы трения и износа. У пар трения, работающих при оптимальной чистоте поверхностей трения, оно проявляется в меньшей степени, чем в процессе приработки. Из наших исследований вытекает, что при оптимальной чистоте поверхностей трения момент (а следовательно и коэффициент) трения, износ пары, работа, трения и температура буксы минимальные, хотя величина R_u благодаря наростообразованию изменяется, оставаясь в пределах этого класса чистоты.

Утверждение, что увеличение высоты шероховатостей по сравнению с оптимальным значением повышает износ за счет возрастания механического зацепления, скалывания и среза шероховатостей поверхностей, приведенное Маталиным [1], полностью подтверждается. В то же время уменьшение высоты шероховатостей против оптимального значения, которое приводит к резкому возрастанию износа за счет возникновения молекулярного сцепления и заедания плотно соприкасающихся поверхностей повышенной гладкости (чему способствует выдавливание и плохая смачиваемость смазкой зеркально чистых поверхностей) нашими исследованиями [2] не вполне подтверждается.

Так, для пары трения ролик—термически не обработанная букса из чугуна при достижении поверхностями трения чистоты $\nabla 9$ резко повышается температура, момент и работа трения. При чем чистота $\nabla 9$ при нагрузке $126,6 \text{ кг/см}^2$ не является оптимальной. Оптимальной же является $\nabla 7$ для ролика и $\nabla 8$ буксы.

Температура буксы может достигать 132° , причем и на ролик и на буксе нет следов нагара. Износ при этих условиях мало изменяется, но за счет молекулярного сцепления в отдельных контактируемых местах возрастает работа трения. Мощность в этом случае будет расходоваться больше на приведение в действие агрегата.

При чистоте поверхностей трения, больше оптимальной, возрастает работа трения и температура. Причем возрастание силы трения за счет молекулярного сцепления и приводит к росту момента, коэффициента и работы трения.

Температура, моменты и работа трения на 10000 оборотов

| Износ, мк | | | | Работа трения, кг·см | |
|---|--------|--|--------|---|--|
| при оптимальной чистоте поверхностей трения | | при чистоте поверхностей трения $\nabla 9$ | | при оптимальной чистоте поверхностей трения | при чистоте поверхностей трения $\nabla 9$ |
| ролик | букса | ролик | букса | | |
| 0,05 | 0,0214 | 0,08 | 0,0198 | 43,4—45,8 | 243—363 |

нижнего ролика при оптимальных условиях и при чистоте поверхностей трения $\nabla 9$ для пары ролик — термически не обработанная букса приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что износ ролика на 0,03 превышает износ при оптимальных условиях трения, тогда как износ букс почти одинаковый. Работа трения при чистоте поверхностей трения $\nabla 9$ возрастает в $5,8 \div 8$ раз, температура в $3,46 \div 4,4$ раза и момент трения в $5,9 \div 8$ раз по сравнению с оптимальными условиями трения. Причем значения температуры, работы и момента трения не остаются постоянными, а изменяются в процессе исследования (при чистоте поверхностей трения $\nabla 9$) за счет наростообразования. Сама же чистота поверхностей трения R_a увеличивается или уменьшается, но остается в пределах $\nabla 9$. А с изменением ее меняется и момент трения.

Таким образом, как в процессе первоначальной приработки, так и при установившемся процессе трения (включая и оптимальные условия трения) процессу трения сопряженных пар сопутствует наростообразование, которое в какой-то мере раньше не учитывалось. Это подтверждается на всех испытанных нами парах трения, у которых ролик был изготовлен из термически обработанного чугуна, а букса — из электролитических хрома и никеля из ванн 30, 11, 10 и 3, а также пар трения, у которых ролик также был изготовлен из чугуна, термически обработанного, а букса из чугуна как термически обработанного, так и чугуна без термообработки. Оно проявляется в различной мере для различных пар трения, но неизменно сопутствует им в процессе трения и износа.

Во многих исследованиях утверждается, что при определенных условиях в трущихся парах может произойти схватывание. И это действительно так. Благодаря чему может произойти схватывание? На наш взгляд, первой причиной схватывания трущихся пар является увеличивающееся наростообразование. В процессе первоначальной приработки, когда чистота поверхностей трения еще не достигла оптимального значения, имеет место интенсивное наростообразование. Интенсивность его зависит в первую очередь от нагрузки.

Таблица 1

| Температура трения, °С | | Момент трения | | Чистота поверхностей трения | | | |
|---|-----------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|
| При оптимальной чистоте поверхностей трения | при чистоте поверхностей трения 9 | при оптимальной чистоте поверхностей трения | при чистоте 9 поверхностей трения | при оптимальных условиях трения | | при чистоте поверхностей трения 9 | |
| | | | | ролик | булка | ролик | булка |
| 30 | 132—104 | 8,0—8,75 | 86,25—40 | 7 | 8 | 9 | 9 |

При оптимальной чистоте поверхностей трения наростообразование минимально. Если с этого исходного состояния увеличивать нагрузку, то момент трения начинает расти, вследствие увеличения наростообразования, до определенного момента.

Более повышенная нагрузка может привести к улучшению чистоты поверхностей (с увеличением нагрузки чистота поверхностей трения сначала ухудшается) и достигнуть оптимального значения, но может быть нагрузка и такой, которая приведет к более интенсивному наростообразованию и к схватыванию поверхностей трения.

На снимках, полученных с помощью электронного микроскопа, ясно видны риски, которые подтверждают описанные нами явления. Образовавшийся нарост нарушает поверхности трения, прорезая на сопряженной поверхности канавку определенной глубины. Когда сила резания достигает величины, большей, чем сила сцепления нароста с поверхностью, на которой он образовался, последний срывается и нарушает поверхность детали. Таким образом, величина удельного давления ($кг/см^2$) в местах действительного контакта соприкасающихся пар является определяющим фактором (при прочих равных условиях) к наростообразованию.

Если при данной чистоте поверхностей трения и нагрузке наростообразование не перейдет через максимум, то взаимной приработкой пары трения достигнуть не смогут. Это приведет в дальнейшем к схватыванию трущихся поверхностей. Известно, что пары трения, имеющие одноименную кристаллическую решетку, всегда отличаются повышенным коэффициентом трения. Это объясняется хорошим условием для наростообразования. Если пары трения изготовлены с оптимальной чистотой поверхности, то период приработки будет минимален. Это и есть необходимые и достаточные условия для увеличения ресурса сопряженных пар при прочих равных условиях.

В процессе эксплуатации зачастую меняются условия работы, а следовательно, и шероховатость трущихся поверхностей (изменение R_a или R_z). Последняя, как правило, не выходит за пределы оптимального значения и отвечает лучшим условиям с точ-

ки зрения износа, которые могут сохраняться при необходимом и достаточном количестве смазки. В период первоначальной приработки, когда наблюдаются мгновенные повышения температур, излишнее количество смазки будет ухудшать условия трения и способствовать наростообразованию. Высышки больших температур могут привести к разложению масла, вследствие чего выделится большое количество тепла, которое в этом месте ухудшит чистоту поверхностей трения. Последнее приведет к мгновенному увеличению момента трения. Мгновенное увеличение температур может привести к тому, что наростообразование в процессе приработки не пройдет через максимум. В дальнейшем это приведет к увеличению наростов, ухудшению чистоты поверхностей и к схватыванию. Чтобы бороться со схватыванием поверхностей трения, необходимо создать условия, при которых наростообразование будет минимальным.

Учитывая большое значение, которое играют наросты в процессе трения и износа, необходимо показать процесс образования их. Входящие в непосредственное соприкосновение детали машин изготовлены с определенной точностью, исходя из выбранной посадки и заданной шероховатости поверхностей трения. Направление следов обработки в них в ряде случаев не совпадает, что создаст благоприятные условия для образования наростов.

После непосредственного контакта деталей, если у них чистота поверхностей трения была меньше оптимальной, замечается значительный рост момента и работы трения, что ведет к повышению температуры трущихся пар. Шероховатость поверхностей (величина R_a или R_z), как правило, ухудшается, постепенно растет момент трения, связанный с образованием наростов. Сначала, когда наростообразование незначительное, момент трения будет меньшим, а затем по мере увеличения его растет момент трения и температура. Вследствие зацепления неровностей происходит отделение продуктов износа (срезание неровностей поверхностей трения). В местах среза образуются ювелирные поверхности. Продукты износа вместе с маслом движутся между трущимися поверхностями, поэтому такие активные места на поверхностях трения образуются в разных ее частях в зависимости от сочетания высоты неровностей на трущихся деталях. При определенном давлении будут преобладать упругие деформации. Должна установиться действительная площадь соприкосновения, что и приведет в дальнейшем к оптимальной чистоте поверхностей трения. При недостаточной же опорной площади всех микроконтактов из-за большого удельного давления имеют место пластические деформации. Это приводит к появлению микроскопических продуктов износа в масле между трущимися деталями.

При отделении частичек износа по поверхности их образуют-

ся совершенно чистые микроплощадки с весьма активной поверхностью, на которых в данное мгновение нет окисных пленок. Но пространство между двумя трущимися поверхностями ограничено, поэтому в дальнейшем активная частичка износа может быть заторможена и задержана на одной из них. Силы межмолекулярного сцепления войдут в действие. Им будет содействовать давление между трущимися поверхностями в этом месте и частичкой износа. Образовавшийся микронарост будет иметь большую твердость, вследствие своеобразной проковки его между двумя поверхностями.

Имея хорошее сцепление с одной из поверхностей трения и большую твердость, этот микронарост будет срезать слои из сопряженной детали сначала на наиболее возвышающихся частях поверхности, а затем начнет делать сплошной срез. В это время поверхность у него будет становиться активной, способной к присоединению новых отделившихся частичек износа, в том числе и срезанных им, т. е. нарост, присоединяя эти активные частички, сам увеличивается в размерах. Рост его зависит от взаимной скорости перемещения и удельного давления между трущимися поверхностями.

Если давление не превышает критического для данного состояния поверхностей трения, наростообразование достигает максимального значения и затем вследствие улучшения чистоты поверхностей трения станет уменьшаться. Вместе с ним уменьшатся и момент трения, работа трения и температура. Если же при данном давлении наростообразование будет все время увеличиваться, т. е. при данной исходной чистоте поверхностей оно не обеспечит достижения нужной степени приработки вследствие преобладания пластической деформации в местах соприкосновения пар трения, то увеличивающееся наростообразование приведет к схватыванию поверхностей трения. Образовавшиеся наросты при благоприятных условиях увеличиваются и становятся элементарными резами. По мере увеличения их сила резания будет возрастать. В дальнейшем она может достигнуть величины, большей, чем сила сцепления нароста с деталью.

При этих условиях наблюдается срыв его и повреждение той поверхности, на которой он ранее удерживался. Такое явление можно наблюдать, если после достижения оптимальной чистоты поверхностей трения (при которой момент, работа и коэффициент трения, износ ролика и буксы и температура буксы будут минимальными) увеличивать нагрузку. В этом случае наблюдается увеличение момента трения от изменения степени приработки, которая возрастает. Температура, момент и работа трения будут увеличиваться из-за роста пластической деформации.

Подобное явление можно наблюдать при увеличении удельного давления. Несмотря на то, что на предыдущей нагрузке были достигнуты оптимальные условия трения, при определенном

превышении нагрузки (разном для различных пар трения) достигнуть оптимальных условий трения не представляется возможным. Этому мешает увеличивающееся наростообразование, которое, как правило, приводит в дальнейшем к схватыванию поверхностей. Постепенное повышение нагрузки может несколько сдвинуть свой максимальный предел, при котором наростообразование перейдет через максимум, и в дальнейшем чистота поверхностей трения будет приближаться к оптимальной.

Выводы

1. Электронномикроскопические исследования поверхностей трения подтверждают явление наростообразования, которое сопутствует процессу трения и износа сопряженных пар.

2. Рассмотрение сущности процесса трения и износа без учета явления наростообразования, которое сопутствует ему, является неполным, так как не отражает действительности этого процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маталин А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. Машгиз, 1956.

2. Суслов В. П. и Ищенко А. Ф. Исследование износа чугуна при различных нагрузках. Сборник научных трудов аспирантов. Минск, Изд-во «Урожай», 1965.

3. Суслов В. П., Ищенко А. Ф. Сравнительные исследования износа электролитических покрытий. Сборник научных трудов аспирантов. Минск, Изд-во «Урожай», 1965.