

АНТИФРИКЦІЙНІ ТА ФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 531.44:669.3:669...691

А. М. Ковальченко, канд. техн. наук, старш. науч. сотруд.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОКСИДНЫХ ПЛЁНОК, СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ И ГЕОМЕТРИИ КОНТАКТА НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ СХВАТЫВАНИЯ В МЕДНОЙ ПАРЕ ТРЕНИЯ

Институт проблем материаловедения им. И. Францевича НАН Украины

Проведено исследование развития процессов схватывания в зависимости от состояния окисных плёнок на поверхности меди. Показано положительное влияние количества окислов на поверхности на замедление возникновения схватывания. Отмечена необходимость соблюдения идентичных геометрических параметров узла трения при сравнительных испытаниях с использованием схемы контактирования «образец-диск».

Введение. В некоторых узлах трения существуют условия, при которых должны быть обеспечены электропроводность трибоконтакта, максимальная возможность теплоотвода для ограничения роста температуры и, при этом, невозможно использование жидких и твёрдых смазочных материалов. Для этого наиболее очевидным представляется применение в качестве трущегося материала высоко электро- и теплопроводного металла как медь. Однако, по сравнению с другими металлами, медь обладает пониженной твёрдостью и температурой плавления, так же как повышенной пластичностью, то есть свойствами, способствующими схватыванию [1–5]. Тем не менее, медные образцы показали меньшие коэффициенты трения по сравнению с нержавеющей сталью, алюминием, вольфрамом, титаном и молибденом при трении без смазки по медным же пластинам [6] на протяжении относительно продолжительного скольжения (до нескольких минут) до наступления схватывания. Как и предполагалось, и также было подтверждено микрорентгеноспектральным анализом поверхности [6], данное трибологическое поведение было связано с наличием поверхностных оксидных плёнок, служащих твёрдой смазкой. Как было отмечено в [7], окисные плёнки не только снижают взаимодействие несмазанных металлических поверхностей, но и ограничивают рост числа связей

на ранней стадии скольжения, что снижает первоначальный износ. Но, несмотря на доказанность положительного влияния окислов на оттягивание возникновения схватывания, влияние количества окислов на медной поверхности, а также параметров нагружения не было исследовано.

Использованная в [6] схема контактирования «образец-диск» (pin-on-disc) является наиболее распространённой в мире схемой испытательных узлов машин трения благодаря своей простоте. Фирмы «Center for Tribology, Inc.», «Compass Instruments», «CSM Instruments», «Micro Photonics», «Phoenix Tribology», «Falex Corporation», «Plint & Partners, LTD» и некоторые другие серийно выпускают машины трения с такой конфигурацией. Плоская поверхность одного диска позволяет проводить неоднократные испытания по свежей поверхности, меняя диаметр дорожки трения. Повторные испытания всегда необходимы для получения статистически достоверных данных, а также для получения сравнительных данных испытаний различных материалов, когда поверхность одного диска является уникальной и труднопроизводимой. Это часто случается в научной практике при нанесении покрытий, модификации поверхности, при оптимизации состава или технологического режима, а также при необходимости получения большого количества различных поверхностей при ограниченности ресурсов и времени. Но изменение диаметра дорожки трения связано с изменением скорости и пути трения, как и условий теплоотвода. Данный факт всегда вызывает вопрос о правомерности сравнения трибологических данных, полученных при различной геометрии контактирования. В этой связи была поставлена цель испытаний.

Постановка задачи. Целью данной работы являлось как исследование влияния различных окисных плёнок на поверхности меди, так и варьирования диаметра дорожки трения и скорости скольжения на динамику возникновения схватывания.

Методика эксперимента. Трибологические испытания были проведены на машине трения UMT-3 производства фирмы «Center for Tribology, Inc.»". Цилиндрический образец диаметром 1,62 мм, изготовленный из отпущенной меди (тип S, HV_{50g-f} 95,5 кг/мм²) прижимался под нагрузкой 10 Н к вращающейся медной плитке (тип C182, HV_{50g-f} 99,5 кг/мм²) размером 60×60×5 мм. Схема кон-

фигурации узла трения представлена на рис. 1. Поверхность плиток обрабатывалась карбидкремниевой абразивной бумагой. При завершающей полировке использовалась бумага с зернистостью 4000 grit, после чего параметры шероховатости поверхности были $R_a = 0,01$ мкм и $R_z = 0,67$ мкм.

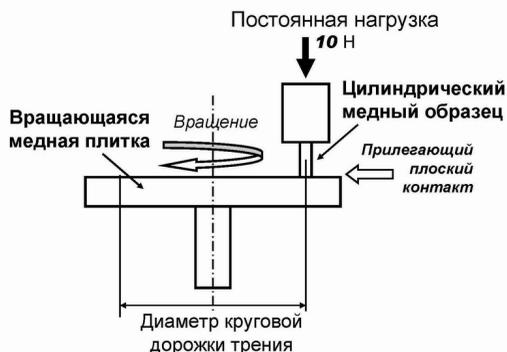


Рис. 1. Конфигурация узла трения «образец-диск»

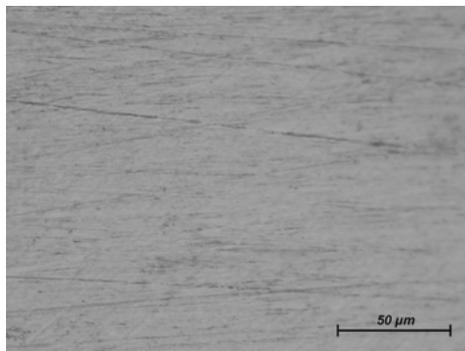
Были исследованы три типа поверхности меди с различной степенью формирования окисных плёнок на поверхности:

1. Свеже-полированная поверхность, когда с момента полировки до трибоиспытаний проходило не более 1-го часа. Поверхность имела выражено блестящий и зеркальный вид, косвенно свидетельствующий о незначительном количестве окислов на поверхности.

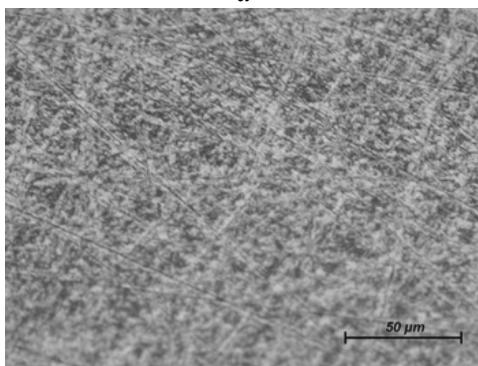
2. Поверхность, выдержанная на воздухе в течение 1-го месяца, в результате чего происходило формирование более объемных и плотных окисных плёнок. Поверхность имела более тусклый и матовый вид, явно различимый невооружённым глазом.

3. Необработанная поверхность после изготовления и неизвестного продолжительного времени пребывания на воздухе. Поверхность имела грубый пятнистый вид с разнообразием оттенков.

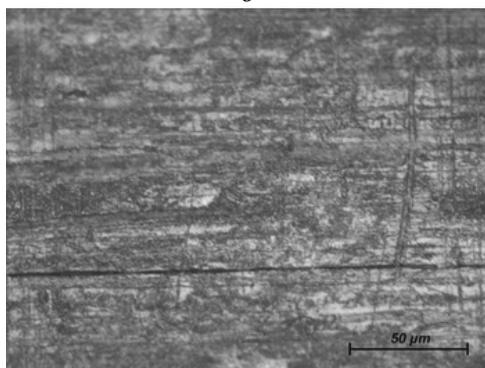
Исходные медные поверхности представлены на рис. 2. Микрорентгеноспектральные исследования на сканирующем электронном микроскопе LEO 1530 выявили от 2 до 3 ат.% кислорода на поверхности свежее-полированных пластин и 4-6 ат.% на пластинах с месячной выдержкой на воздухе, что прямо свидетельствует о формировании более плотных окисных плёнок. Соответствующие спектры представлены на рис. 3.



a

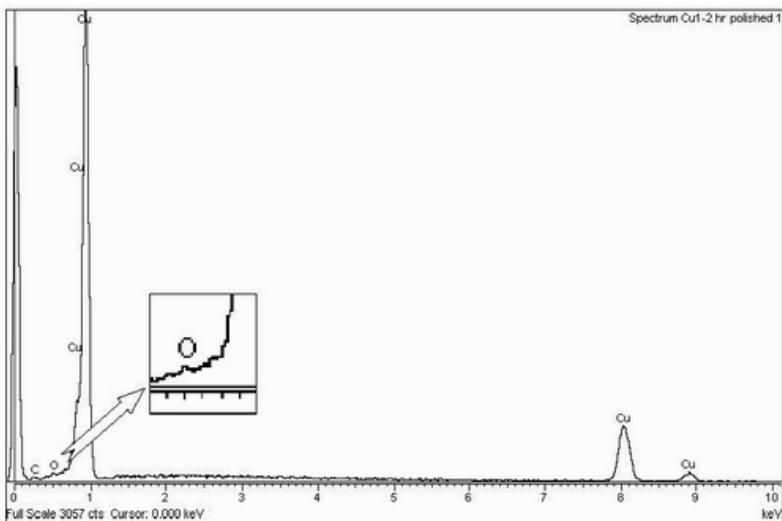


б

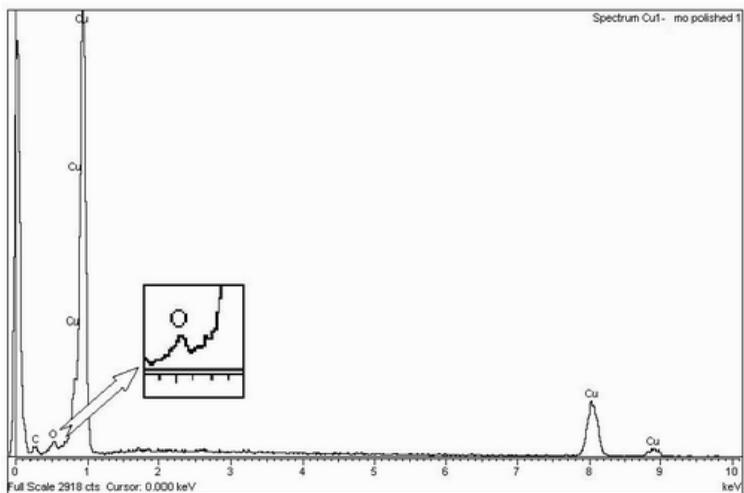


в

Рис. 2. Оптические изображения свежее-полированной (*a*), выдержанной на воздухе в течение 1-го месяца (*б*) и необработанной (*в*) поверхности меди



a



б

Рис. 3. Микро-рентгеновские спектры свежe-полированных (*a*) и выдержанных на воздухе в течение месяца (*б*) медных пластин

Рабочая поверхность цилиндрического неподвижного образца прирабатывалась о закреплённую на плите шлифовальную и полировальную бумагу непосредственно перед испытаниями. Параметры шероховатости были такими же, как и у полированных пластин. Перед испытаниями поверхности промывались ацетоном для полного удаления возможных органических загрязнений.

Типичное трибологическое поведение исследованных пар трения представлено на рис. 4. После начала испытаний наблюдалось плавное бесшумное скольжение с небольшими колебаниями коэффициента трения. Средние значения коэффициента трения были в диапазоне от 0,16 до 0,27 у свежее-полированных пластин, от 0,11 до 0,25 у monthly-выдержанных на воздухе пластин и от 0,2 до 0,35 у необработанных пластин. Дорожка трения, при этом, была весьма ровной, с явно выглаженными исходными неровностями (рис. 5, а).

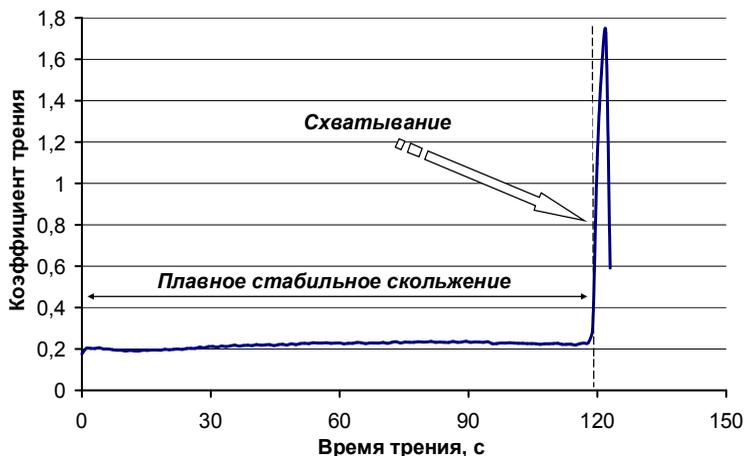
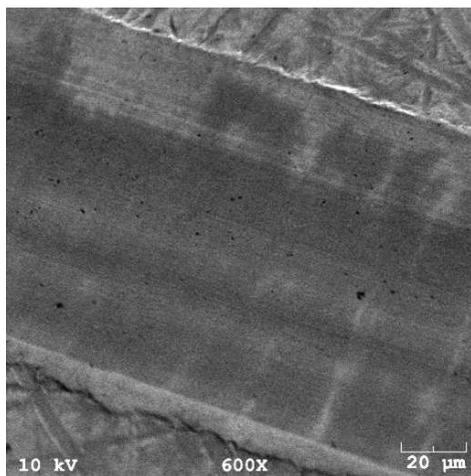


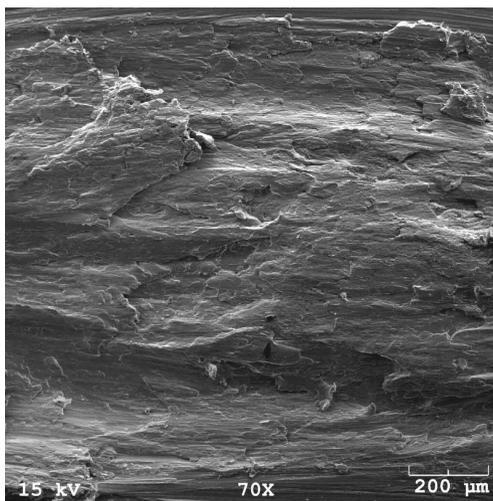
Рис. 4. Типичное изменение коэффициента трения исследованных пар

После столь плавного скольжения происходило схватывание, сопровождаемое скачкообразным возрастанием коэффициента трения (см. рис. 4), тряской, резким скрипящим звуком и катастрофическим разрушением обеих рабочих поверхностей (рис. 5, б). Время плавного скольжения до схватывания и было основным регистрируемым параметром. Следует отметить, что полученные данные по времени до наступления схватывания, характеризовались большим разбросом значений, до 40 %. На ниже представленных графиках

будут указаны средние значения нескольких испытаний. Кроме того, ввиду неопределённости процесса схватывания, речь будет идти не о четких определённых зависимостях, а скорее о тенденциях.



a



б

Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения дорожки трения на медной пластине до (*a*) и после (*б*) схватывания

Экспериментальные результаты. Первая серия трибоэкспериментов была проведена при постоянной, 60 об/мин, скорости вращения медных плит и изменяющемся диаметре дорожки трения. То есть, при изменении диаметра дорожки трения от 4 до 57 мм, линейная скорость скольжения увеличивалась с 0,012 до 0,18 м/с (рис. 6), соответственно увеличивался и путь трения. Полученные значения времени трения (и количества оборотов) до схватывания (рис. 7, *a-в*) в зависимости от диаметра дорожки трения не характеризуются чёткой связью. Но путь трения до наступления схватывания (рис. 8, *a-в*) имел чёткую тенденцию к увеличению с увеличением диаметра дорожки трения (и соответственно скорости скольжения). Одновременно четко прослеживается различие в общем времени и пути трения до начала схватывания для различных типов пластин (рис. 7 и рис. 8); время и путь до схватывания было минимальным у свежеполитрованных пластин (рис. 7, *a* и рис. 8, *a*), «выдержанные» имели максимальное время скольжения и путь трения до схватывания (рис. 7, *б* и рис. 8, *б*), а необработанные пластины имели промежуточные значения (рис. 7, *в* и рис. 8, *в*).

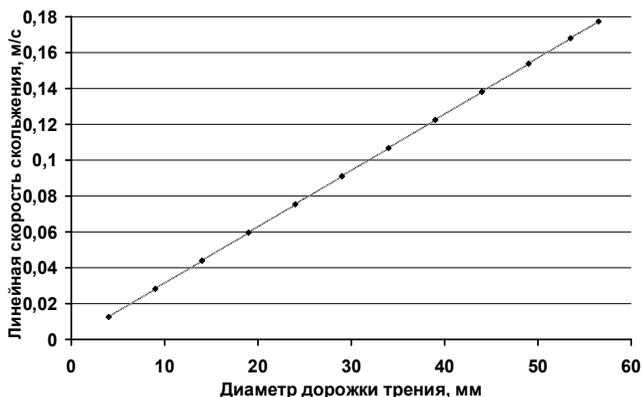
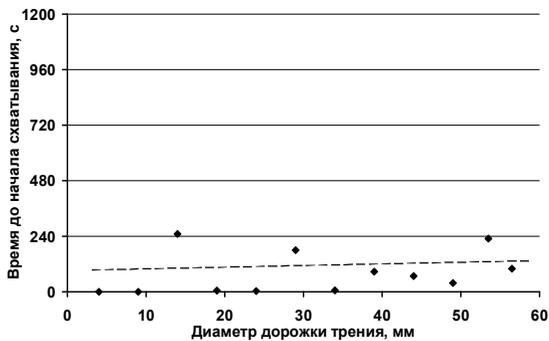
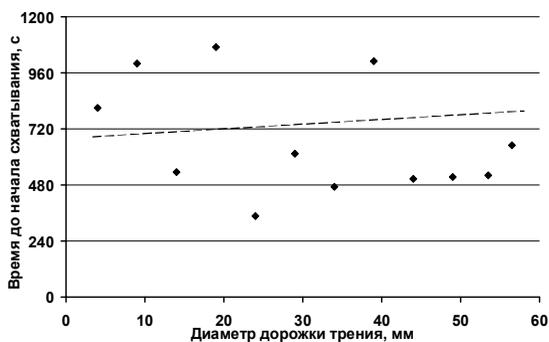


Рис. 6. Скорость скольжения с изменением диаметра дорожки трения при постоянной (60 об/мин) скорости вращения медных плит

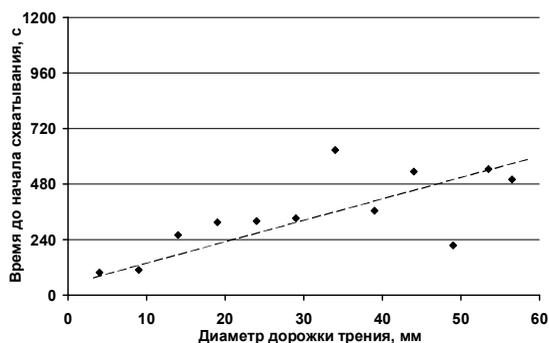
Вторая серия экспериментов была проведена при постоянной, 0,15 м/с, скорости скольжения и меняющемся диаметре дорожки трения от 4 мм до 58 мм. Соответственно скорость вращения пластин уменьшалась с увеличением диаметра дорожки трения как показано на рис. 9.



a

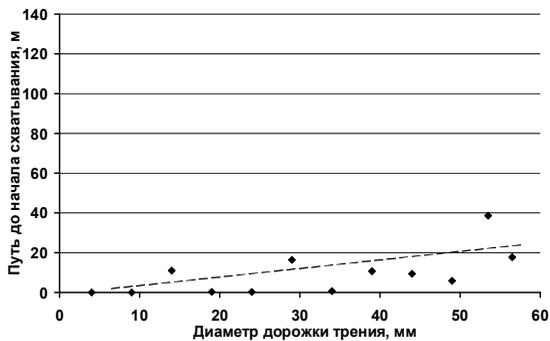


б

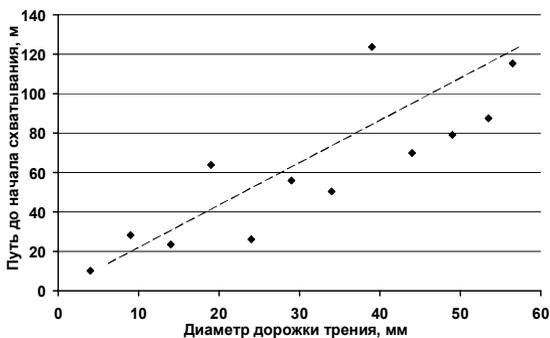


в

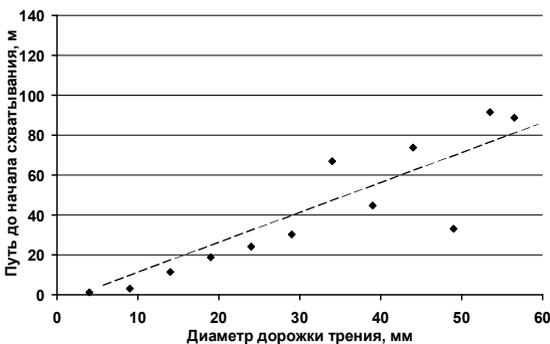
Рис. 7. Зависимость времени трения до схватывания с изменением диаметра дорожки трения у свежесполированных (*a*), выдержанных на воздухе в течение 1-го месяца (*б*) и необработанных (*в*) медных пластин при постоянной (60 об/мин) скорости вращения



a



б



в

Рис. 8. Зависимость пути трения до схватывания с изменением диаметра дорожки трения у свежe-полированных (*a*), выдержанных на воздухе в течение 1-го месяца (*б*) и необработанных (*в*) медных пластин при постоянной (60 об/мин) скорости вращения

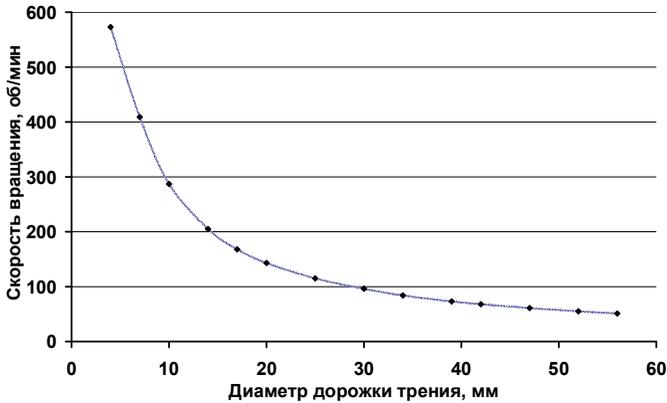
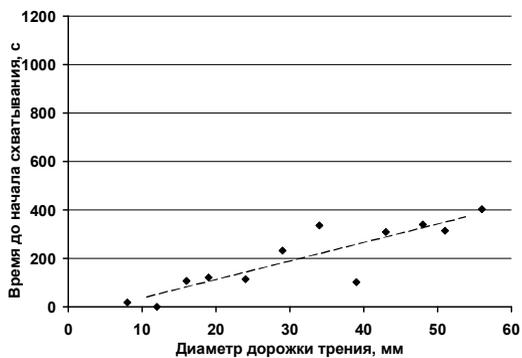


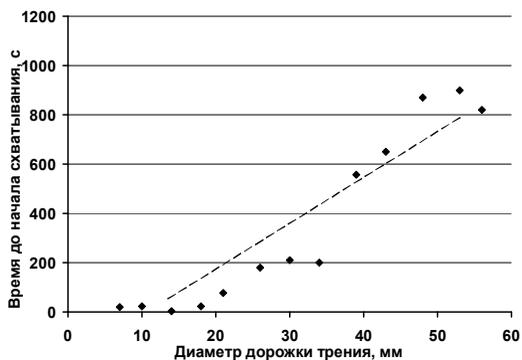
Рис. 9. Скорость вращения медных плит с изменением диаметра дорожки трения при постоянной (0,15 м/с) скорости скольжения во второй серии опытов

Время и путь трения до наступления схватывания увеличивались с увеличением диаметра дорожек трения (рис. 10 и рис. 11), причём наибольшее время до схватывания при наибольших диаметрах дорожек трения было у пластин, выдержанных на воздухе в течение месяца (рис. 10, б и рис. 11, б). Минимальное время до схватывания было у свежее-полированных пластин (рис. 10, а и рис. 11, а). Рассматривая зависимость количества оборотов до схватывания от диаметра дорожки трения (рис. 12), отчётливо прослеживается тенденция их увеличения у первых двух групп пластин (рис. 12, а-б) и совершенно хаотический разброс количества оборотов до схватывания у необработанных пластин (рис. 12, в). Что касается зависимости времени скольжения до схватывания от скорости вращения пластин (рис. 13), то, при общем падении, при скоростях вращения выше 200 об/мин, схватывание наступало очень быстро у первых двух групп пластин (рис. 13, а, б). У необработанных пластин (3-я группа), время до схватывания при высоких скоростях вращения (малых диаметрах дорожек трения), так же как путь и количество оборотов до схватывания было сравнительно большим (рис. 10, в – рис. 13, в).

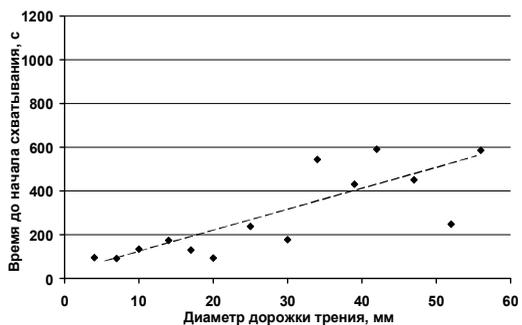
Обсуждение. Рассматривая трение и наступление схватывания в рассмотренных парах трения можно утверждать, что исходные, т. е. сформированные до трения окисные плёнки, играют первостепенную роль.



a



б



в

Рис. 10. Время трения до схватывания в зависимости от диаметра дорожки трения у свеж-полированных (*a*), выдержанных на воздухе в течение 1-го месяца (*б*) и необработанных (*в*) медных пластин при постоянной (0,15 м/с) скорости скольжения

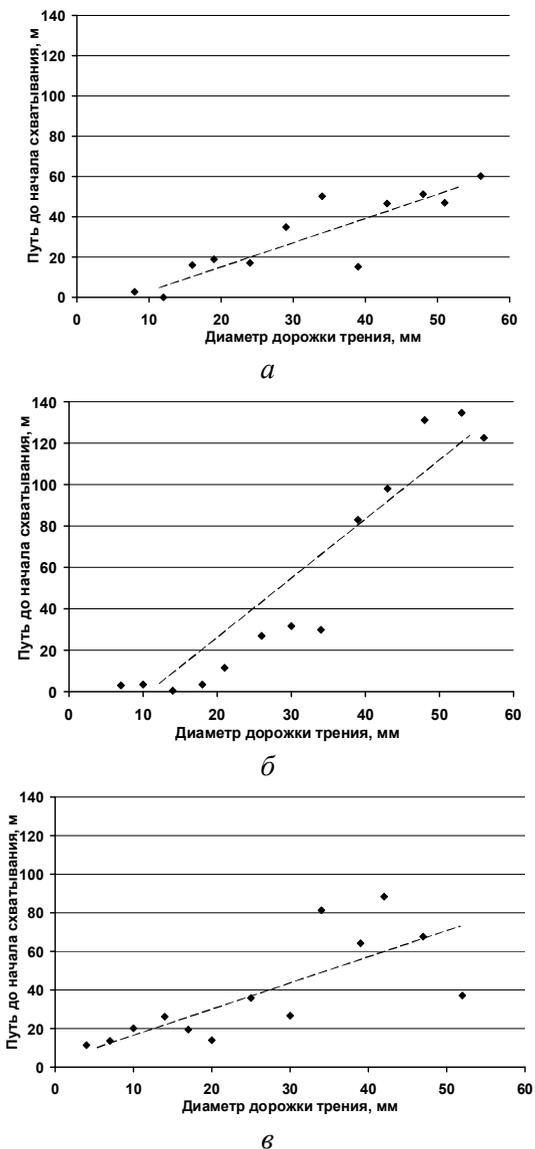
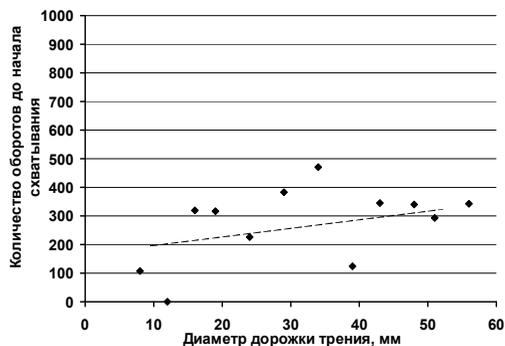
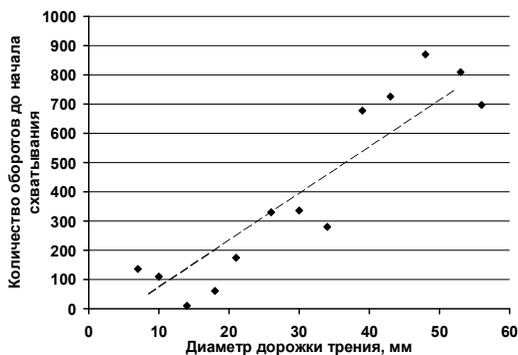


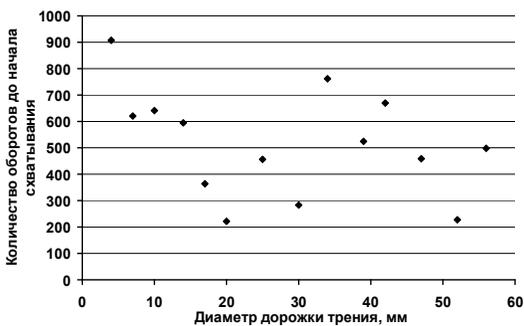
Рис. 11. Путь трения до схватывания в зависимости от диаметра дорожки трения у свежe-полированных (а), выдержанных на воздухе в течение 1-го месяца (б) и необработанных (в) медных пластин при постоянной (0,15 м/с) скорости скольжения



a

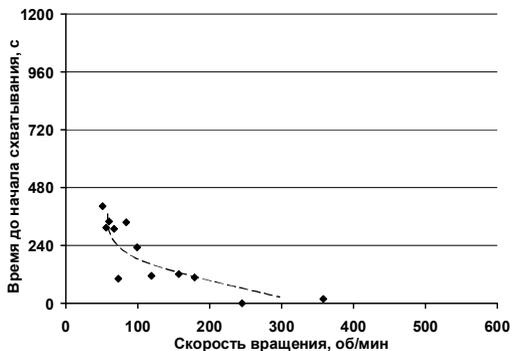


б

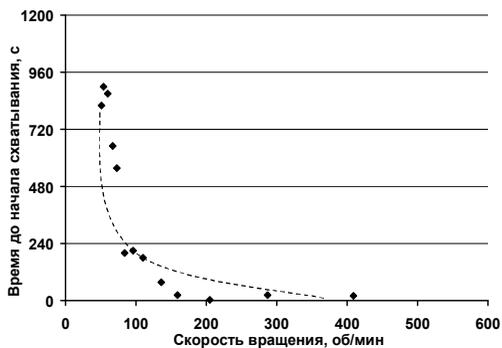


в

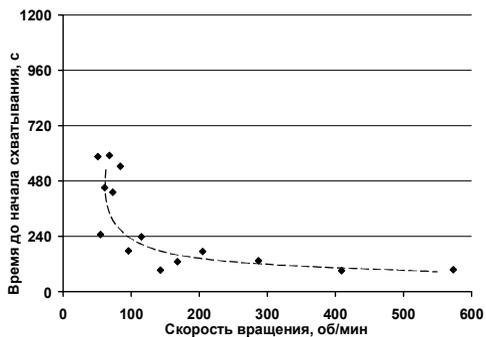
Рис. 12. Количество оборотов до схватывания в зависимости от диаметра дорожки трения у свеж-полированных (*a*), выдержанных на воздухе в течение 1-го месяца (*б*) и необработанных (*в*) медных пластин при постоянной (0,15 м/с) скорости скольжения



a



б



в

Рис. 13. Время трения до схватывания в зависимости от скорости скольжения у свежеполированных (*a*), выдержанных на воздухе в течение 1-го месяца (*б*) и необработанных (*в*) медных пластин при постоянной (0,15 м/с) скорости скольжения

С другой стороны, базируясь на определении окислительного износа, при котором характеристики трения зависят от образования и разрушения оксидных плёнок [8, 9] в самом процессе трения, необходимо учитывать и возможность формирования окисных плёнок непосредственно при трибоиспытаниях. Предположительно, образование новых окислов имело место при повышенных скоростях скольжения, когда происходило более интенсивное генерирование тепла. Этим можно объяснить увеличения времени и пути трения до схватывания с увеличением линейной скорости скольжения в первой серии опытов (см. рис. 6–8), при увеличении диаметра дорожки трения и при постоянной угловой скорости. Рост температуры, однако, способствует развитию схватывания ввиду пластификации металла [1–4]. Предположительно, рост объемной температуры контактирующих образцов при высоких скоростях вращения пластин (рис. 13) служил причиной быстрого наступления схватывания во второй серии опытов (рис. 9–13). Очевидно, что генерирование тепла при высоких угловых скоростях и малых диаметрах дорожек трения (примерно до 2-х сантиметров) происходило более интенсивно, чем теплоотвод из зоны трения. При низких угловых скоростях и больших диаметрах дорожек трения, условия теплоотвода были более благоприятными, и объемная температура возрастала с меньшей скоростью.

Данные большинства трибоэкспериментов свидетельствуют, что пластины, выдержанные на воздухе в течение месяца, характеризуются наибольшим временем, путём трения и количеством оборотов до наступления схватывания, а свежее-полированные пластины – наименьшим. Эти результаты согласуются с данными [2], где показано, что очень тонкие окисные плёнки незначительно предохраняют от схватывания. Толстые же плёнки (специально сформированные при повышенных температурах) так же не предохраняют эффективно от схватывания, так как отличаются повышенной хрупкостью и легко отслаиваются при скольжении. Наиболее всего предохраняют от схватывания плёнки средней толщины, обладающие хорошей адгезией и равномерно распределенные по поверхности.

В общем виде процесс трения и схватывания в медной паре может быть описан следующим образом. Окисные плёнки на поверхности первоначально служат естественной твёрдой смазкой и обеспечивают относительно низкое трение. По мере продолжения

скольжения происходит съём этих плёнок и наступает схватывание. Время до наступления схватывания зависит от количества и консистенции окисных плёнок. Одновременно могут формироваться новые окислы, что оттягивает схватывание. Формирование новых плёнок, как и тепловой режим трибосочленения зависят как от скорости, так и от геометрической конфигурации узла трения (диаметр дорожки трения). Взаимодействие или преобладание процессов съёма исходных окислов, формирование новых окислов, как и динамики теплового режима трибосочленения, приводит к ускорению или замедлению возникновения схватывания.

Полученные результаты показывают невозможность корректного сравнения данных различных трибоиспытаний (по крайней мере, при изучении схватывания) когда сохраняется скорость скольжения или вращения при изменении диаметра дорожки трения в конфигурации «образец-диск».

Выводы. Время до наступления схватывания в паре медь-медь зависит от характера исходных окисных плёнок на поверхности: Более продолжительная выдержка полированных медных пластин на воздухе способствует формированию более плотных окисных плёнок, которые замедляют развитие схватывания при трении.

Скорость наступления схватывания сильно зависит как от геометрических параметров трибосочленения, так и от скоростного режима трения.

Сравнительные испытания различных образцов при использовании схемы контактирования “образец-диск” и изучении схватывания могут быть корректными лишь при соблюдении одинаковой геометрии трибосочленения.

Признательность. Данная работа выполнена в рамках гранта ONR-MURI № N00014-04-1-0601 в Производственно-Исследовательском Центре (MARC) при Технологическом Институте Джорджии (Georgia Tech), Атланта, США.

Список литературы

1. Семёнов А.П. Схватывание металлов. – М.:Машгиз, 1958.–279 с.
2. Голего Н.Л. Схватывание в машинах и методы его устранения – К.:Техніка, 1965. – 231 с.
3. Dyson A. / Scuffing – a review: Part 1 // Tribology International. – 1975. – Vol. 8. – С.77–87.

4. Dyson A. / Scuffing – a review: Part 2: The mechanism of scuffing // Tribology International. – 1975. – Vol. 8. – С.117–122.

5. Bowman W.F., Stachowiak G.W. A review of scuffing models // Tribology Letters. – 1996. – Vol. 2. – С. 113 – 131.

6. Kovalchenko A.M., Blau P.J., Qu J., Danyluk S. / Scuffing tendencies of different metals against copper under non-lubricated conditions // Wear. – 2011. – Vol. 271, № 11–12, – С. 2998–3006.

7. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твёрдых тел. – М.:Машиностроение, 1968. – 543 с.

8. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.:Техніка, 1970. – 396 с.

9. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.:Машиностроение, 1968. – 480 с.

Ковальченко А.М. Дослідження впливу поверхневих оксидних плівок, швидкості ковзання і геометрії контакту на виникнення щеплення у мідній парі тертя // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.:НАУ. – 2011.– Вип.56. – С.220–237.

Проведено дослідження розвитку щеплення залежно від стану окисних плівок на поверхні міді. Показано позитивний вплив кількості оксидів на поверхні на уповільнення виникнення щеплення. Відзначено необхідність дотримання ідентичних геометричних параметрів вузла тертя при порівняльних випробуваннях з використанням схеми контактування «зразок-диск».

Рис. 13, список літ. 9 найм.

Kovalchenko A.M. Investigation of the effect of surface oxide films, sliding speed and contact geometry on the scuffing initiation in the copper friction pair.

The study of scuffing development depending on a state of oxide films on copper surface was carried out. The positive effect of amount of oxides on the surface on slowdown in scuffing was shown. The necessity for compliance with identical geometrical parameters of a friction unit in comparative tests using the contacting scheme «pin-on-disc» was noted.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2011