

С. С. ГРАНИН, А. В. РАВИЧ

ИЗНОС УГЛЕГРАФИТОВЫХ И ХРОМИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАР ТРЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КОНТАКТНО-ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Из всех применяемых в машиностроении типов уплотнений вращающихся валов контактно-торцовые уплотнения обеспечивают наименьшие утечки уплотняемой среды, обладают рядом эксплуатационных преимуществ, могут применяться для широкого диапазона жидких и газообразных сред.

Однако серьезным препятствием для внедрения контактных уплотнений в ответственных узлах с напряженными параметрами, например, для уплотнений валов газотурбинных двигателей, где окружные скорости достигают 100 м/сек , является мнение о низкой надежности узла уплотнения. Это мнение обосновывается возможностью разрушения уплотнения от различных (порой случайных) причин без предварительных предупреждающих явлений. Следовательно, основным фактором работоспособности контактно-торцовых уплотнений следует считать износостойкость материалов пары трения. Только после обеспечения удовлетворительной износостойкости пар трения при скорости скольжения до 20 м/сек , давлении уплотняемых сред $(30 \div 40) \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$, температуре $50 \div 400^\circ\text{C}$ [12] стало возможным широкое внедрение этого типа уплотнений.

Установлено, что для тяжелых условий работы (высоких скоростей скольжения, высокого уровня давлений и температур в местах уплотнения) наиболее перспективными оказались углеграфитовые материалы, работающие в паре с металлическими поверхностями.

Процессы, происходящие при трении углеграфита по металлу, исследовались различными авторами [1, 2, 4—12, 14, 15]. На основании этих работ можно сделать некоторые выводы:

Высокие антифрикционные свойства углеграфита объясняются его способностью образовывать в процессе трения пластинчатые кристаллиты.

На процесс образования кристаллитов решающее влияние оказывает среда, под воздействием которой происходит коррозионное растрескивание. В результате ослабляются связи между гексогональными плоскостями кристаллической решетки углерода.

Кристаллиты углерода пристаю к поверхности металла. Прочность сцепления кристаллитов с металлом во многом определяется свойствами окислов на поверхности металла.

При относительном перемещении металла и углерода скольжение происходит по гексогональным плоскостям кристаллитов.

Кристаллиты адсорбируют из окружающей среды на своей поверхности пары и газы, подавляющие краевые силы, в результате чего уменьшаются силы трения.

Процесс трения зависит от скорости скольжения, так как последняя определяет скорость деформации материалов поверхностей и связана со скоростью химического воздействия среды.

Для получения минимальной силы трения и износа в паре трения углерод — металл необходимо:

создать углерод, хорошо образующий кристаллиты с нужными свойствами;

подобрать металл, хорошо адсорбирующий на своей поверхности кристаллиты углерода;

обеспечить условия для максимальной адгезии кристаллитов на поверхности металла;

иметь такую среду в зоне трения, чтобы при заданных условиях — температуре, удельном контактом давлении, скорости скольжения — обеспечить скольжение кристаллитов друг относительно друга с минимальным трением;

иметь скорость образования новых кристаллитов, равную скорости их удаления из зоны трения;

обеспечить среду, оптимальную по составу, так как при чрезмерно интенсивном коррозионном растрескивании будет иметь место обильное образование новых кристаллитов, быстрое их измельчение и удаление из зоны трения. При недостаточной химической активности среды образованию новых кристаллитов будет сопутствовать рост температуры в зоне трения.

В настоящей статье приводятся результаты испытаний по экспериментальной доводке пар трения контактно-торцового уплотнения, предназначенного для герметизации валов от протечек воздуха при скорости скольжения до 100 м/сек. Испытания проводились на стенде, представленном на рис. 1. Для пары трения использовались углеродные кольца и диски из материала 40ХНМА с гальванически хромированной торцовой поверхностью.

Материал углерода представляет собой гетерогенную структуру, состоящую из углеродных сеток или зерен с различной микротвердостью, связанных в жесткий каркас и полученных как на мягкой основе, так и на основе твердых сажевых агломератов.

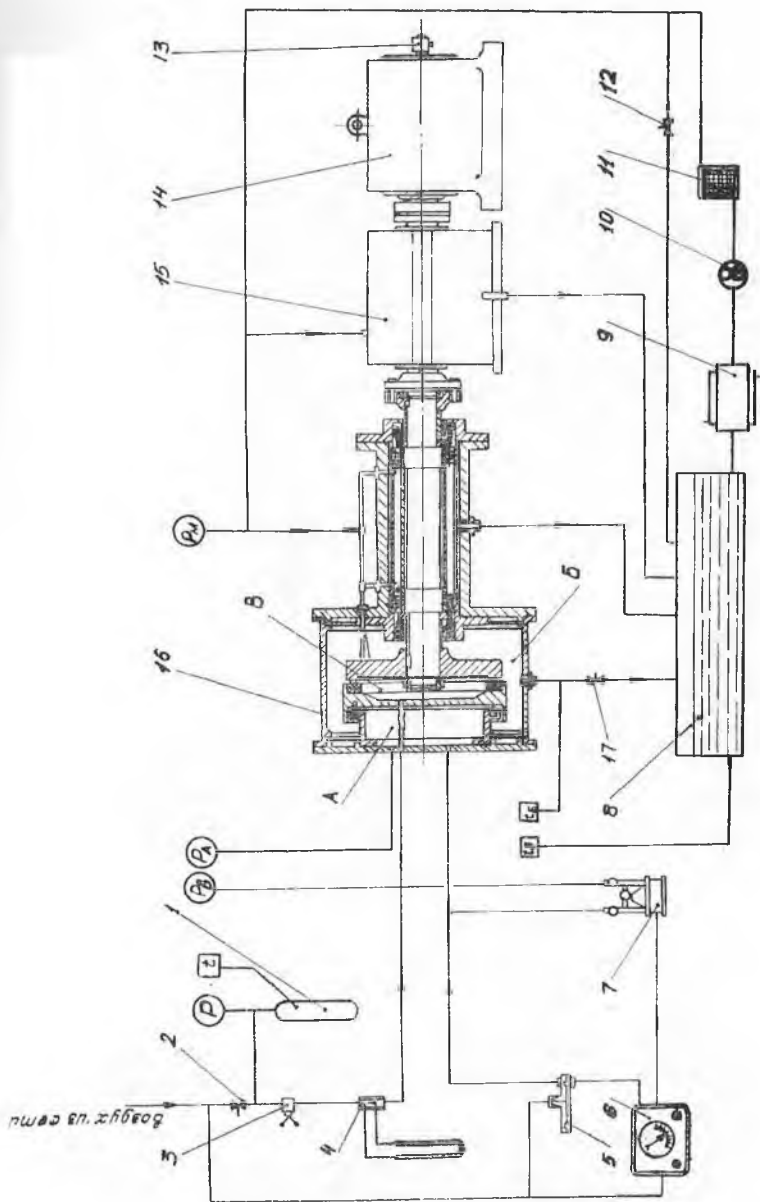


Рис. 1. Схема стенда для испытания пар трения:

- 1 — баллон мерный; 2 — кран; 3 — редуктор воздушный; 4 — расходомер; 5 — клапан;
 6 — ЭПИД; 7 — дифманометр; 8 — маслябак; 9 — холодильник; 10 — маслянасос; 11 — фильтр;
 12 — кран дроссельный; 13 — датчик тахометра; 14 — электромотор; 15 — редуктор; 16 — ус-
 тановка; 17 — кран

Некоторые углеграфиты пропитывались фуриловой смолой, фосфатной солью или медью.

Перед испытанием контактный поясок углеграфита шириной $2 \div 4$ мм притирался по чугунной плите без абразива. Поверхность диска хромировалась гальваническим способом на толщину $150 \div 200$ мк, шлифовалась и притиралась на плите до чистоты $\nabla 10 \div 11$ с неплоскостностью не более 1 мк. Толщина слоя хрома после этих операций оставалась в пределах $60 \div 100$ мк. Впослед-

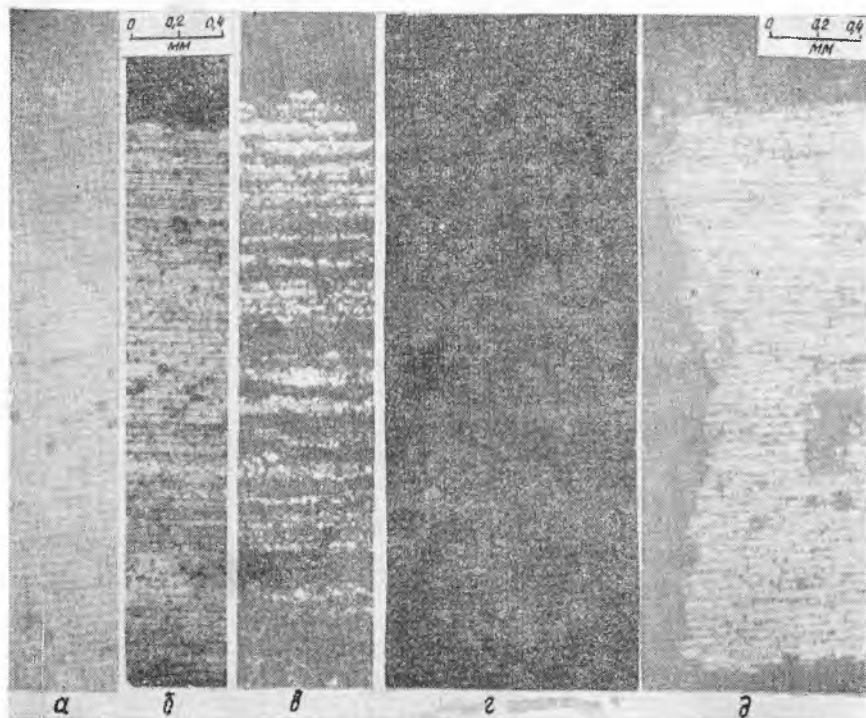


Рис. 2. Износ углеграфита:

а — равномерный без рисок; *б, в* — с круговыми рисками; *г, д* — с выкрашиванием крупных участков

ствии для избежания шлифовочных трещин операция шлифовки была исключена. После хромирования на толщину $30 \div 50$ мк проводилась притирка.

Программа испытаний включала в себя:

а) приработку пары трения при скорости скольжения от 10 до 100 м/сек ступенями через 10 м/сек с выдержкой по 1 часу на каждой ступени; при скорости 20 м/сек выдержка производилась 3 часа;

б) испытания в масле при скорости скольжения 70 м/сек в течение 25 часов. Газотурбинное масло — ГОСТ 10289—62 — омывало пару трения по наружному диаметру;

в) испытания в масле при скорости скольжения 100 м/сек в течение 100 часов;

г) испытания без масла при скорости 70 м/сек в течение 100 часов.

Удельное контактное давление в паре трения поддерживалось в пределах $(1 \div 1,5) \cdot 10^5$ н/м². На отдельных режимах к внутреннему диаметру пары трения подводился воздух с давлением

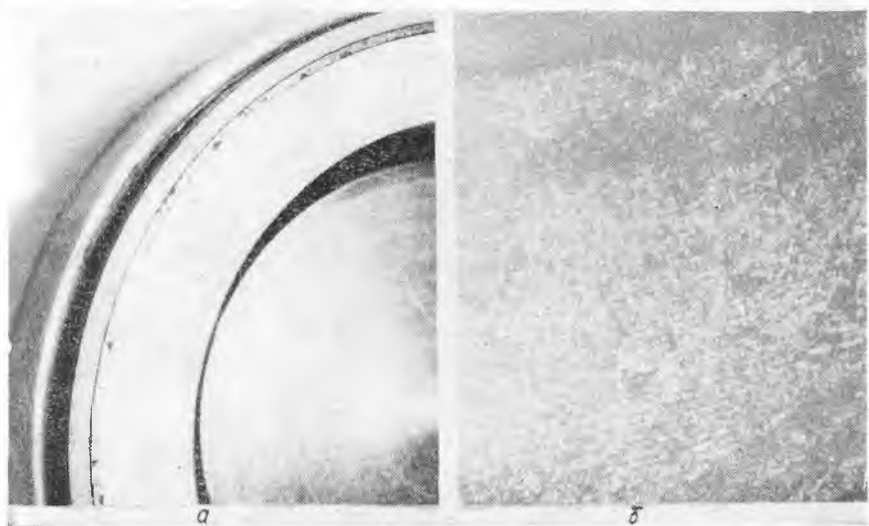


Рис. 3. Усталостный износ углеграфита с точечным выкрашиванием: а — вид на кольцо в крышке; б — вид на поверхность углеграфита

$(0,25 \div 0,5) \cdot 10^5$ н/м². О работоспособности пар трения судили по величине износа, утечке воздуха и масла и по состоянию поверхностей трения. За время испытаний, общая продолжительность которых составила 6000 часов, в паре с гальванически хромированными поверхностями было испытано свыше 15 марок различных углеграфитов. Проведенные испытания позволили установить и систематизировать виды износа поверхностей пар трения на скорости скольжения до 100 м/сек. Работоспособность пар трения зависела от вида развивающегося износа на поверхности углеграфита и хромированного диска.

Износ углеграфитовых поверхностей имел четыре вида:

1. Равномерный износ без видимых рисок и следов выкрашивания. Поверхность имела гладкий, блестящий вид. Фотография поверхности представлена на рис. 2а.

2. Износ с круговыми рисками, образовавшимися от точечных очагов размером от нескольких микро до 1 мм (рис. 2б, в).

3. Износ с усталостным точечным выкрашиванием (рис. 3а, б).

4. Износ с выкрашиванием крупных участков и разрушением значительной части контактной поверхности (рис. 2 г. д.).

Износ первого вида во времени происходил равномерно. Его интенсивность не превышала 1 мк/час. Углеграфиты с поверхнос-

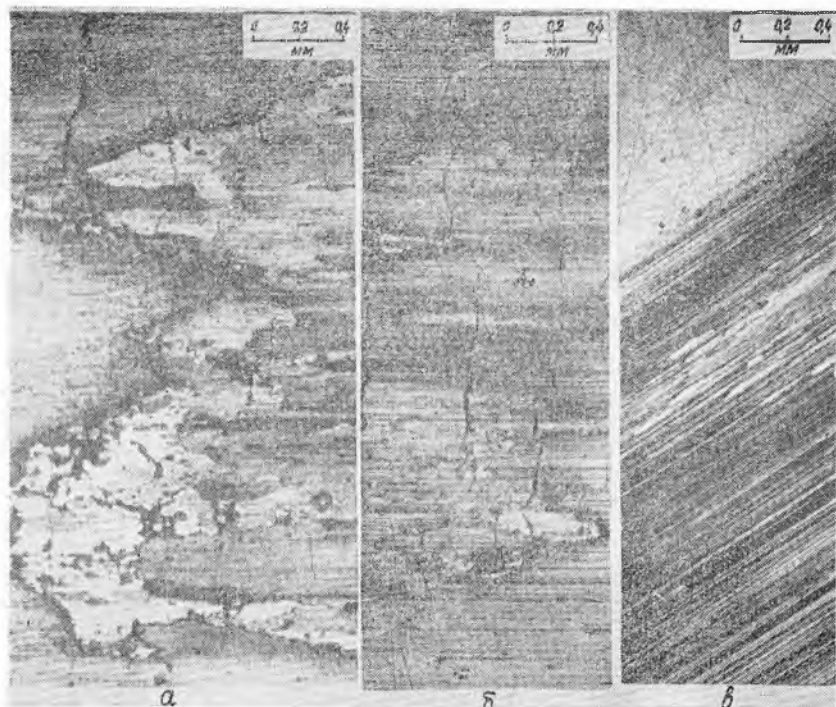


Рис 4. Износ хромированной поверхности с переносом материала:
а — конец наволакивания; б — начало наволакивания; в — местное наволакивание

тями такого вида выдерживали испытания при скорости 100 м/сек длительностью до 500 часов.

Износ второго и третьего видов происходил с интенсивностью 3÷5 мк/час. Стойкость пары трения с износом этого вида не превышала 100÷200 часов.

Износ четвертого вида, как правило, приводил к катастрофическому разрушению пары трения.

Износ хромированных поверхностей контактных дисков происходил с переносом материала, с образованием радиальных и сетки коммуницирующих трещин, с образованием круговых концентрических рисок, с коррозией материала.

Износ с переносом материала происходил при значительных перегрузках пары трения на высоких скоростях скольжения (рис. 4а, б, в). Для появления такого вида износа необходимы, по крайней мере, два условия: высокая температура в зоне трения и местные связи контактирующих поверхностей.

Начальный разогрев поверхностей мог произойти в результате преобладающего износа другого вида, например, с образова-

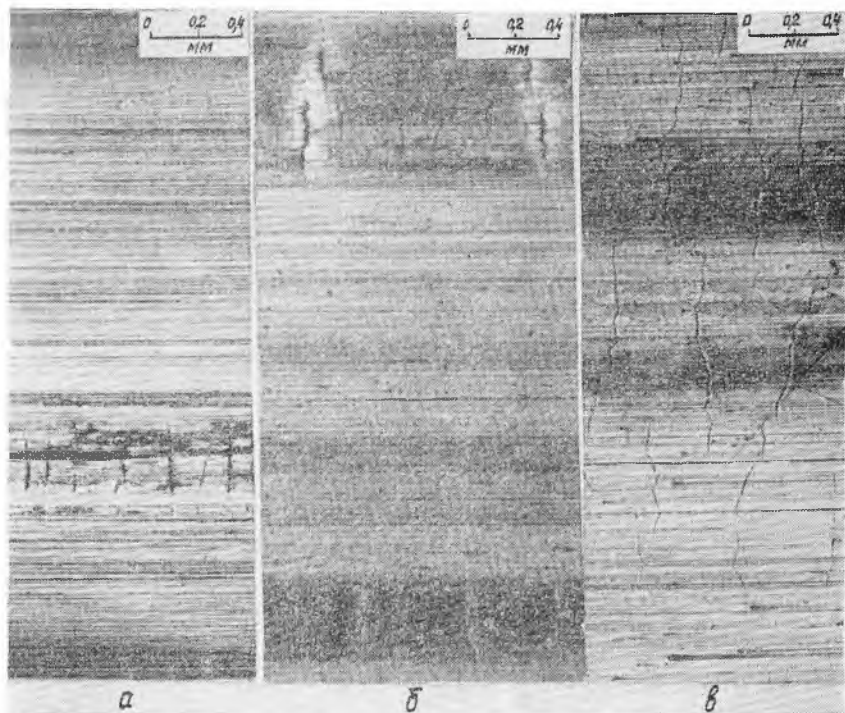


Рис. 5. Износ хромированной поверхности с образованием радиальных трещин: а — в середине контакта; б — по краям контакта; в — по всей ширине контакта

нием круговых рисок или радиальных трещин (на рис. 4б. отчетливо видны и круговые риски и радиальные трещины). Затем по мере разогрева поверхностей начинал прогрессировать и преобладать износ с переносом материала, что еще больше повышало температуру в зоне трения. В последующих стадиях износа увеличивалась роль окислительных процессов на трущихся поверхностях, что резко уменьшало схватывание и перенос материала. Последний иногда происходил по всей ширине контакта (рис. 4а), иногда имел местный характер (рис. 4б), но почти всегда приводил к катастрофическому разрушению пары трения. Износ такого вида указывает, во-первых, на возможность возникновения при оп-

ределенных условиях прочных местных связей между углеродом и хромированной поверхностью, и, во-вторых, на то, что температура в поверхностных слоях при трении достигает таких высоких значений, при которых резко снижаются механические характеристики хрома.

Износ с образованием радиальных и сетки коммуницирующих трещин является весьма распространенным в проведенных испытаниях. Радиальные трещины на поверхности хрома развивались,

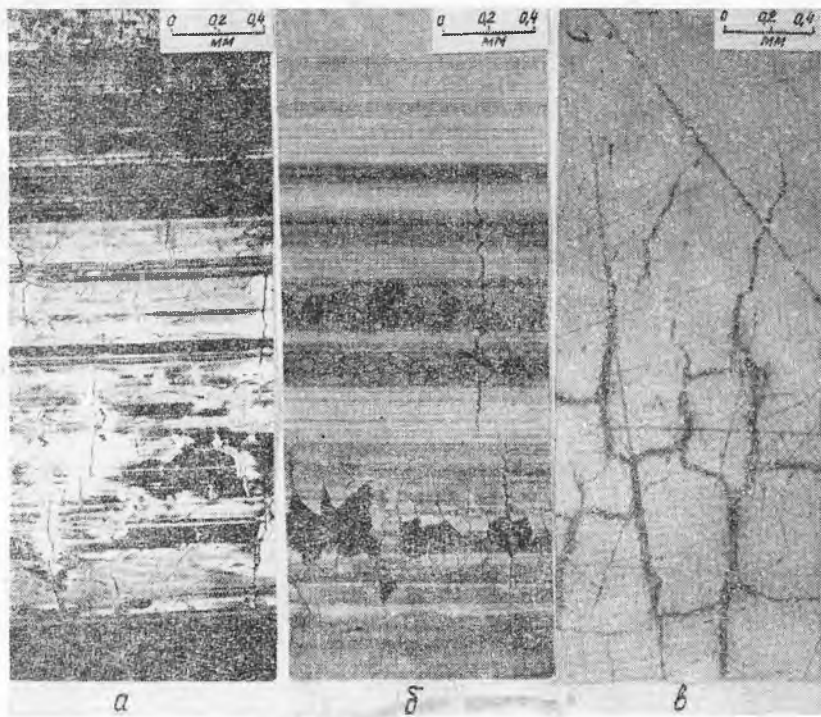


Рис. 6. Износ хромированной поверхности с образованием сетки коммуницирующих трещин:

а — поверхность после испытаний; *б* — усталостное выкрашивание хрома по границам коммуницирующих трещин; *в* — поверхность п.а притертая перед дальнейшим испытанием.

как правило, из зон максимального перегрева в середине контакта (рис. 5а) или одновременно в нескольких местах (рис. 5б), что указывает на неравномерный характер удельного контактного давления в паре трения. Терморастрескивание такого рода, описанное А. И. Голубевым [4], происходит в результате потери плоскостности в зоне трения. Поверхность из-за разницы тепловых расширений наружных и внутренних слоев приобретает волнообраз-

ную форму. Во впадинах радиально направленных волн возникают трещины. Пара трения с таким износом хромированной поверхности теряет герметичность и разрушается с постепенно нарастающей интенсивностью.

Износ с образованием сетки коммуницирующих трещин во многих случаях являлся положительным фактором, способствующим износостойкости пары трения. Сетка трещин на хромированной поверхности, представленная на рис. 6а, видимо, облегчает

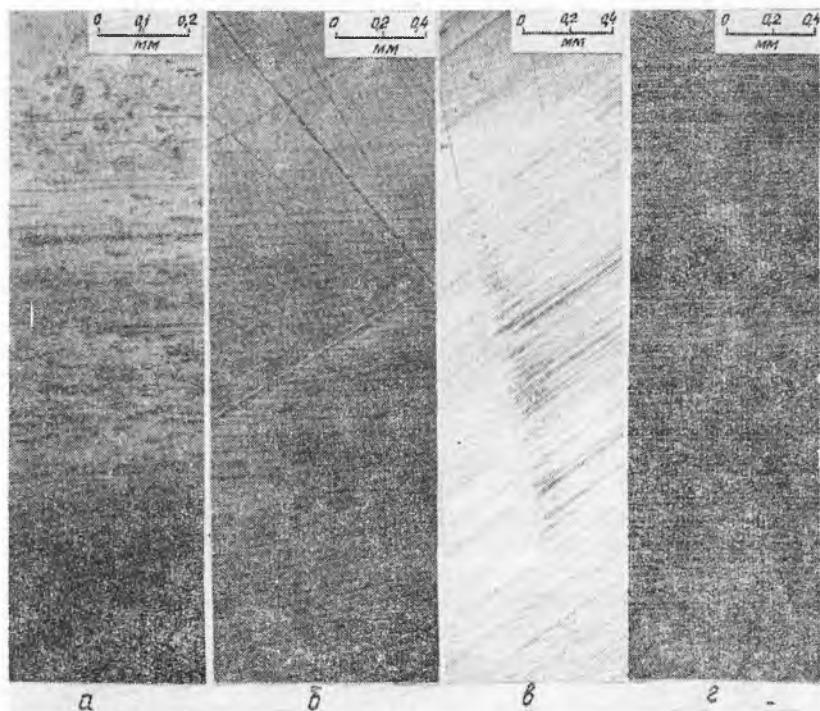


Рис. 7. Износ хромированной поверхности с образованием круговых рисок: а — круговые риски от горячих очагов; б, в — круговые риски от рисок притирки; г — круговые риски от частиц, попавших в контакт.

подвод смазки в зону трения, что уменьшает разогрев. Пары трения с поверхностями такого вида проходили 500-часовые испытания. Интенсивность износа не превышала нескольких десятых долей микрона в час. Тем не менее, иногда на поверхностях с сеткой коммуницирующих трещин происходил катастрофический износ из-за отрыва частичек хрома, ограниченных трещинами и утративших связь с основным материалом (рис. 6б). Ослабление связей объясняется усталостными явлениями. Образованию сетки коммуницирующих трещин на хромированных поверхностях спо-

состоятся значительные остаточные растягивающие напряжения в слое хрома, возникающие при гальваническом процессе.

Износ с образованием круговых концентрических рисок на хромированных поверхностях происходил в начальных стадиях практически на всех испытаниях пар трения. По своей природе — это износ абразивного характера. Его появление в проведенных испытаниях обусловлено, по нашему мнению, следующими факторами:

1) Во время притирки в хромированную поверхность внедряются зерна притирочного абразива, которые впоследствии, при трении, протаскиваются по поверхности, образуя кольцевые риски (рис. 7г).

2) Во время притирки на хромированной поверхности образуются отдельные глубокие риски, ориентированные в различных направлениях. Они заполняются абразивными зернами и другими твердыми частицами. В процессе трения они могут заполняться твердыми продуктами износа поверхностей трения и другими частицами, заносимыми в зону трения уплотненными средами или образующимися при определенных условиях из уплотняемых сред. Впоследствии, при определенных условиях, отдельные частицы извлекаются из риски и прорезают круговые риски, начинающиеся из различно ориентированных рисок притирки. По мере развития такого вида износа риска притирки постепенно размывается и исчезает с поверхности трения. Этот процесс иллюстрируется рис. 7в.

В экспериментах А. И. Голубева [4] подобные риски притирки являлись положительным фактором, способствующим смазке трущихся поверхностей. В наших экспериментах положительного влияния рисок притирки не обнаружено, что, возможно, объясняется высокой скоростью скольжения в паре трения.

3) На притертой хромированной поверхности иногда имеется целая система мелких точечных углублений, которые заполняются подобно притирочным рискам различными твердыми частицами. На рис. 7а представлена хромированная поверхность трения, на которой круговые риски образуются именно от таких точечных углублений. В верхней части снимка расположена зона, не попавшая в контакт. На ней заметно большое количество темных пятен размером от 5 до 50 мк. По мере перехода от этой зоны к зоне трения видно развитие круговых рисок из точечных очагов. Вначале они имеют незначительную протяженность, затем удлиняются и, наконец, перерастают в замкнутую круговую риску.

4) Дефекты, развившиеся на контактной поверхности (радиальные и коммуницирующие трещины, перенос материала и т. п.), могут стать источником образования круговых рисок, так как в зону трения попадают твердые частицы продуктов износа поверхностей (см. рис. 4а, 4б, 5а, 5б, 6а). По мнению некоторых авторов, круговые риски на контактных поверхностях пар трения уплотнений увеличивают герметичность, так как увеличивается длина поверхности, на которой дросселируется уплотняемая среда. Однако

с точки зрения износостойкости круговые риски затрудняют обрабатываемость поверхности, что весьма важно для пар трения с углеграфитами.

На некоторых парах трения износ происходил в результате коррозии хромированной поверхности (рис. 8). Коррозия в паре трения, видимо, обусловлена воздействием агрессивных продуктов, выделявшихся или образовавшихся из уплотняющих сред. Этот вид износа прогрессировал на стадиях, когда уже имелась значительная выработка хромированного слоя.

Из приведенных иллюстраций углеграфитовых и хромированных поверхностей видно, что происходил одновременно износ нескольких видов. Так, наряду с переносом материала происходил

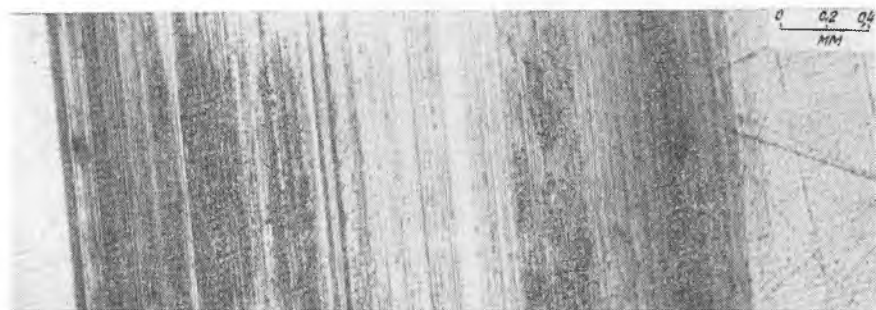


Рис. 8. Коррозионный износ хромированной поверхности.

коррозионный износ, износ с образованием радиальных трещин и круговых рисок (рис. 4а, 4б). Круговые риски образовывались также из сеток коммуницирующих трещин (рис. 6а и 6б) и т. д. Это говорит о том, что процесс трения при высокой скорости скольжения является сложным, многообразным. На определенных стадиях сопутствующий износ может стать преобладающим и наоборот.

Явление усложняется еще тем, что дефекты, возникающие на одной из поверхностей пары трения, порождают дефекты на другой. Это в свою очередь влияет на первоначальный дефект, вызывает его изменения и т. д.

Таким образом, для борьбы с многообразным проявлением износа поверхностей трения при высокой скорости скольжения необходим комплекс мероприятий, исключающий появление любого из видов износа, который в своем развитии порождает другие и приводит к разрушению пары трения в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Ахматов. Молекулярная физика граничного трения. Физматгиз, 1963.
2. Э. Э. Биссон. Применение твердых смазок, в частности графита, при

температурах до 540°C. Сб. «Международная конференция по смазке и износу машин», Госнаучтехиздат, М., 1962.

3. Р. В е н е р. Гальваническое хромирование. Перевод с немецкого. Машиностроение, М., 1964.

4. А. И. Г о л у б е в. Современные уплотнения вращающихся валов. Госнаучтехиздат, 1963.

Г. А. Г о л у б е в, Г. М. К у к н и. Уплотнения вращающихся валов. «Наука», М., 1966.

6. Графит как высокотемпературный материал. Сб. статей под ред. К. П. Власова, перевод с англ. «Мир», 1964.

Д. Ф. Д е л и н. Исследования гидравлических уплотнений. Сб. «Машиностроение за рубежом», № 4(70), 1959.

Р. Ф. Д и к о н, Дж. Ф. Г у д м е н. Ориентация и действие твердых чешуйчатых частиц на металлах при трении. Сб. «Международная конференция по смазке и износу машин», Госнаучтехиздат, М., 1962.

9. Б. И. К о с т е ц к и й, И. Г. П о с о в с к и й. Износостойкость и антифрикционная способность деталей машин. «Техника», Киев, 1965.

10. Б. И. К о с т е ц к и й и др. О роли кислорода при трении скольжения. «Машиноведение», № 6, 1965.

11. Дж. В. М и н г л и, Д. Г. Т и р. Исследование природы трения и механизма износа углерода. Труды амер. общества инженеров-механиков, № 4, 1963.

12. В. Л. С е л и х о в, А. М. Б у я н о в с к и й. Торцовые уплотнения нефтяных насосов. «Недра», М., 1965.

13. Тезисы докладов на IV Киевской научно-технической конференции по вопросам повышения износостойкости и срока службы машин. Киев, 1966.

14. А. С. Ф и л а л к о в. Технология и оборудование электроугольного производства. Госэнергониздат, М., 1958.

15. Е. Ф. Ч а л ы х. Технология углеродистых материалов. Госнаучтехиздат, М., 1963.

16. Campbell W. E., Fczak R. I., 1948, TASMЕ, v 70, p. 491.