

**Аулин В.В.,
Замота Т.Н.,
Лысенко С.В.,
Гринькив А.В.,
Чернай А.Е.**

Центральноукраинский национальный
технический университет,
г. Кропивницкий, Украина
E-mail: AulinVV@gmail.com

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ ПРИ ПРИРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ СОПРЯЖЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ

УДК 621.891+631.3.02

Приработка является процессом сложных трибологических переходов поверхностей трения от нового состояния (после изготовления или ремонта) к приработанному. Окончание приработки наступает после стабилизации основных триботехнических характеристик поверхностей и параметров процесса трения. Закономерности приработки свидетельствуют о том, что исследовать протекание процессов возможно тремя основными способами: по измерению момента трения; по времени перехода сопряжения в стабильное состояние; по характеристикам краткосрочных изменений силы трения. Определение основных закономерностей позволит повысить эффективность приработки поверхностей трения деталей машин.

Ключевые слова: приработка, момент трения, макрогеометрия, контакт сопряженных поверхностей, эффект безызносности.

Введение

Приработка трущихся поверхностей является одним из методов повышения долговечности узлов и агрегатов машин и примером трибологических переходов, характеризующих изменения в характере протекания процессов трения и износа в зависимости от времени, количества циклов или пути трения. Трибологические изменения наблюдаются при смазке или непосредственно в локальной области [1, 2]. Анализ протекания процессов приработки свидетельствует о том, что их закономерности можно исследовать тремя основными способами: по измерению момента трения; по времени перехода сопряжения в стабильное состояние; по характеристикам краткосрочных изменений силы трения [3, 4, 5].

Результаты исследований многих авторов подтверждают, что когда в сопряжении наступает гидродинамический режим смазки, то непосредственный контакт деталей минимальный, а коэффициент трения при этом уменьшается и стабилизируется. Вместе с тем, в инженерной практике существует огромное количество случаев, когда не происходит стабилизации момента трения, что обусловлено характером происходящих моментальных изменений в зоне непосредственного контакта. Очевидно, что трущиеся поверхности находятся в постоянно изменяющихся условиях.

Один из ранних примеров влияния процесса подготовки поверхностей на коэффициент трения описан Ф. Боуденом и Д. Тейбором в работе [4], в которой приработка поверхностей осуществляется с отсутствием поверхностных пленок и в качестве исследуемого материала взято золото. Выявлено, что способ окончательной подготовки трущейся поверхности в значительной степени влияет на характер протекающих при приработке процессов. Более грубые сопряженные поверхности прирабатываются сложнее и коэффициент трения после приработки значительно выше, чем у более качественно подготовленных поверхностей [6]. Наилучшие результаты были получены у выровненных поверхностей электрохимическими методами. Поверхностные пленки также оказывают значительное влияние на изменение коэффициента трения при приработке [7, 8]. Характер протекающих процессов может меняться кардинально и это легко объясняется тем, что процессы трения оказывают максимальное воздействие непосредственно на поверхность детали [9 ... 12].

Для приработки сопряжений деталей двигателей применяют различные методы. Стремление понизить коэффициент трения в начальный период приработки затрудняет макрогеометрическую приспособляемость поверхностей. Добавление различного рода абразивных частиц в зону трения хоть и решает вопросы приработки сопряжений с макрогеометрическими отклонениями, но приводит к шаржированию поверхности с повышенными эксплуатационными износами. Снижение вязкости смазочных материалов могут привести к сближению трущихся поверхностей, появлению зон непосредственного металлического контакта, что, в свою очередь, приводит к задиру.

Наиболее прогрессивными являются методы, в которых совмещены несколько способов приработки, позволяющие повысить эффективность процесса механического взаимодействия трущихся поверхностей за счет воздействия электрической, химической и других энергий. Одним из таких является метод приработки с наложением переменного электрического тока на сопряжения деталей [13]. Преимущество электрохимико-механического воздействия для выравнивания поверхностей сопряженных дета-

лей широко используется в США и Китае [14 ... 18]. Применение совмещённых процессов позволяет получать высокоточные профили поверхностей на твердосплавных деталях или там, где требуется высокая точность геометрической формы. Большое внимание вопросам приработки сопряжений деталей уделяется учеными во всём мире, так Петер Блау [19] выделил восемь разновидностей зависимостей момента трения в начале приработки трибосопряжений. В его работах заложены фундаментальные основы изучения процессов приработки.

Наиболее перспективным при приработке рабочих поверхностей является применение совмещённых процессов в сопряжениях деталей узлов и агрегатов МСХТ. Например, электрохимико-механическое полирование, которое широко применяется для формирования поверхностей с заданными свойствами на деталях из карбида кремния [20], титана [21], на медных поверхностях [22, 23] в электронной промышленности [24]. Основы технологии этих процессов описаны учёными Китая, США и Тайваня [25, 26, 27]. Их применение позволило добиться отличных результатов при изготовлении жестких дисков компьютеров [28]. При этом основы полирования меди и серебра еще раз доказывают эффективность данного вида приработки за счёт того, что формообразование поверхности происходит при гидродинамическом режиме трения за счет электрохимического фактора процесса [29 ... 31]. Применение органических кислот значительно усиливает положительный эффект при химико-механическом полировании поверхностей при изготовлении современных деталей микроэлектронной промышленности [31, 32]. Зарубежными учёными разрабатывались математические модели процессов полирования с учётом внедрения абразивных частиц в обрабатываемую поверхность. Кроме этого, были разработаны модели химико-механического полирования меди с помощью плоского притира [33]. Особое место в исследованиях уделяется формированию разделительных слоев смазки между трущимися поверхностями [32]. Согласно исследованиям Кембриджского и Массачусетского институтов технологии Д. Окуму Оума и Дьюну С. Бонингу эффективным оказывается даже применение химико-механического выравнивания поверхностей с формированием во впадинах шероховатости оксидных пленок [31]. Подобных результатов достиг и Дик де Рувер в своих исследованиях [30].

Исследования контактного взаимодействия смазанных поверхностей, проведенные А.Г. Кузьменко и А.В. Дыхой, позволяют рассмотреть вопросы приработки трущихся поверхностей с учетом механического фактора изнашивания для сопряжений, не имеющих макрогеометрических отклонений [34]. Метод оценки триботехнических свойств для условий режима работы, представленный в монографии Дмитриченко Н.Ф. и Мацаканова Р.Г. [35], дал возможность построить математическую модель зависимости интенсивности износа от совокупности исходных параметров: толщины масляного слоя, работы трения, динамической вязкости масла, микротвёрдости, режима работы.

Цель работы

Анализ процессов приработки трущихся поверхностей и создание теоретических предпосылок для построения модели трибологических переходов от первоначального до приработанного контакта.

Изложение основного материала

В общем случае процессы приработки деталей сопряжений будут зависеть от начальных условий: изменения сил в непосредственном контакте, скорости и направления взаимного перемещения, возрастания температуры трения, взаимодействия поверхностей с различными смазками и т.д. Отмечаются и другие изменения, происходящие при старении смазок и сопряженных поверхностей. Наибольшее значение имеют условия контакта сопряжений деталей, чистота поверхностей, шероховатость, электрохимическое взаимодействие поверхностей между собой в смазочной среде и разрушение подповерхностных слоев материала деталей (рис. 1).

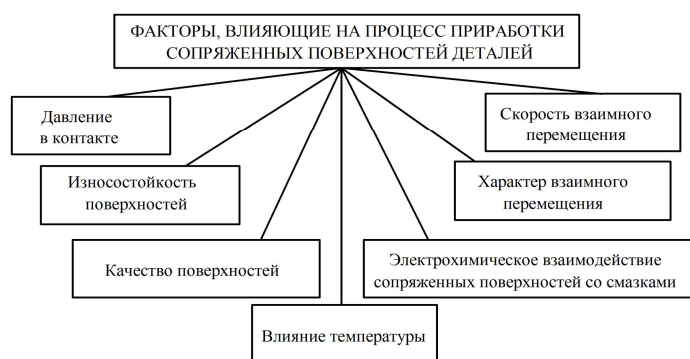


Рис. 1 – Факторы, влияющие на процессы приработки

Для раскрытия трибологических основ повышения эффективности приработки поверхностей трения деталей машин необходимо рассмотреть влияние различных факторов на протекание происходящих процессов. Полученные результаты лягут в основу создания теоретической модели, описывающей изменение момента трения при приработке.

На изменение момента трения, характеризующего различные процессы приработки, влияет целый ряд факторов. К основным из них можно отнести процессы, протекающие в зоне контакта, и оказывающие влияние на возникающий момент трения при приработке трущихся поверхностей: 1 – момент при изменении шероховатости, которая была сформирована при финишной обработке поверхности ($M_{тр\ шер}$); 2 – момент при изменении давления на прирабатываемых поверхностях в процессе приработки макрогеометрических отклонений ($M_{тр\ дав}$); 3 – момент при изменении режимов трения вследствие увеличения площади пятна контакта ($M_{тр\ реж}$); 4 – момент при изменении толщины разделяющего слоя смазки или рабочей среды ($M_{тр\ сл\ см}$); 5 – момент при изменении интенсивности влияния электрохимических факторов процесса при использовании совмещенных методов приработки ($M_{тр\ эл\ хим}$); 6 – момент при изменении влияния присадок на прирабатываемые поверхности ($M_{тр\ прис}$); 7 – момент при изменении характера изнашивания поверхностей и удаления продуктов износа из зоны трения ($M_{тр\ хар\ из}$); 8 – от свойств материала деталей ($M_{тр\ св\ мат}$); 9 – от температуры в зоне трения ($M_{тр\ темп}$).

Математическое описание изменения момента трения за время приработки должно учитывать все вышеперечисленные факторы и их сочетание. Представить это уравнение можно в виде (1):

$$M_{тр} = M_{тр\ шер} + M_{тр\ дав} + M_{тр\ реж} + M_{тр\ сл\ см} + M_{тр\ эл\ хим} + M_{тр\ прис} + M_{тр\ хар\ из} + M_{тр\ св\ мат} + M_{тр\ темп}, \quad (1)$$

Наличие девяти слагаемых в уравнении (1) обуславливает сложность протекающих процессов, которые формируют различные характеры протекания приработки, о чем свидетельствуют графики изменения момента трения, представленные на рис. 2.

Большое количество влияющих факторов способствует протеканию трибологических переходов при приработке трибосопряжений. В идеальных условиях, когда подготовленные поверхности, микро- и макрогеометрия контакта соответствуют приработанным сопряжениям, время такого перехода t_{np1} стремится к 0 (рис. 2, 1). Наличие смазки между трущимися поверхностями кардинально меняет характер изменения момента трения при приработке (рис.2, 2 и рис.2, 3), но количество трибологических переходов при этом не меняется (в обоих случаях наблюдается один переход t_{np1} от начального уровня момента трения до установившегося $M_{уст}$).

Наиболее характерная зависимость изменения момента трения при приработке металлических поверхностей со смазкой (рис.2, 4) происходит за два трибологических перехода. Наличие первого из них t_{np1} объясняется влиянием шероховатости поверхностей на возрастание момента трения, интенсификации процесса изнашивания и постепенной его стабилизацией на втором переходе трибосопряжения t_{np2} к установившемуся приработанному состоянию.

Трибосопряжения, включающие неметаллические материалы, (рис.2, 5, 6, 9, 10) прирабатываются за большее количество трибологических переходов с различным чередованием пиков и впадин на графике изменения момента трения при приработке. Это связано с влиянием температурного фактора, наличием наполнителей и характером выведения их из зоны трения при приработке.

Резкое увеличение нагрузки в металлической паре при сварке трением и возрастание скорости взаимного перемещения в начальный момент приводит к уменьшению момента трения из-за грубой приработки трущихся поверхностей (переход t_{np1} , рис.2, 7). Повышение температуры в зоне трения приводит к образованию зон схватывания и возрастанию момента трения (переход t_{np2} , рис. 2, 7). Нагрев трущихся поверхностей повышает их пластичность и приводит к стабилизации момента трения до уровня $M_{уст}$ в данных условиях эксперимента (переход t_{np3} , рис. 2, 7).

Макрогеометрические отклонения могут усложнить приработку трущихся поверхностей деталей и послужить причиной увеличения количества трибологических переходов с временной стабилизацией момента трения на промежуточном уровне (рис. 2, 8).

Смазка трущихся поверхностей оказывает существенное влияние на протекание процесса приработки. Так, применение консистентной смазки в трибосопряжение "сталь - сталь" (рис. 2, 11) привело к изменению момента трения, характерного, например, для изменения момента трения при приработке металлических поверхностей с обычной смазкой (рис. 2, 4). Количество трибологических переходов возросло до семи, что может быть связано с уменьшением вязкости смазки при повышении температуры в прирабатываемой зоне.

Трибосопряжения с реализацией эффекта безызносности характеризуются периодическим наращиванием на поверхности слоя меди и его постепенного изнашивания. Это приводит к периодическому

возрастанию и уменьшению момента трения с общей тенденцией его стабилизации на определенном уровне $M_{уст}$. Количество трибологических переходов в таких системах может быть неограничено, что отвечает сути проходящих процессов наращивания и изнашивания поверхностей.

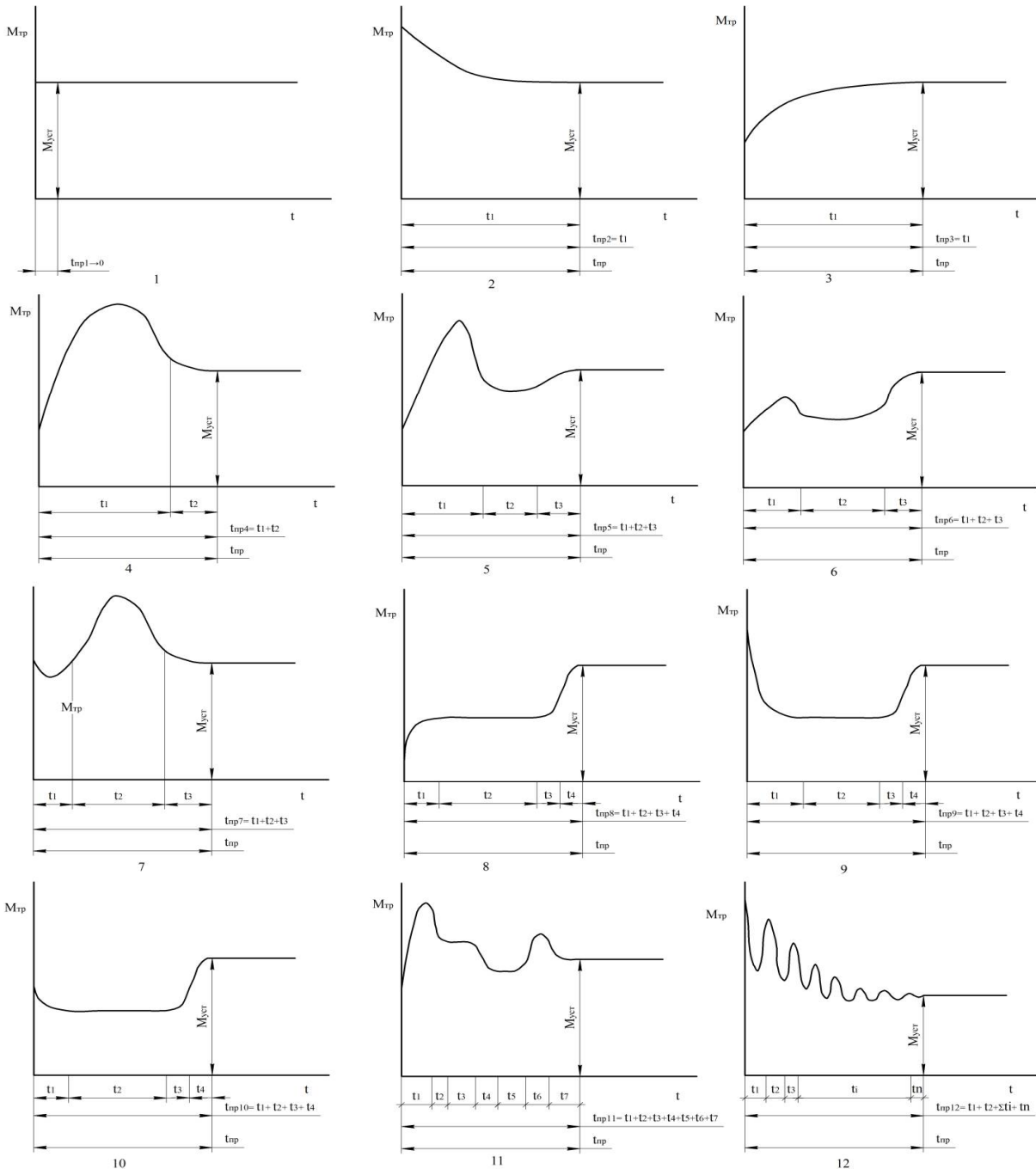


Рис. 2 – Характер изменения момента трения в процессе приработки:

- 1 – идеальные условия;
- 2 – приработка хромированного пальца к чугуному диску со смазкой;
- 3 – приработка металлических поверхностей без смазки;
- 4 – наиболее характерная зависимость изменения момента трения при приработке металлических поверхностей со смазкой;
- 5, 6 – приработка трибосопряжений, включающих неметаллические материалы;
- 7 – изменение момента трения при критических нагрузках в металлическом сопряжении трения (сварка трением);
- 8 – изменение момента трения в сопряжении "бронза - сталь" без смазки при увеличении угла перекоса;
- 9, 10 – изменение момента трения в трибосистемах, включающих полимеры с наполнителями;
- 11 – изменение момента трения в сопряжении "сталь - сталь" при разделении консистентной смазки;
- 12 – изменение момента трения в трибосопряжениях с обеспечением режима безызносности

Анализируя уравнение (1) необходимо проследить взаимосвязи процессов, влияющих на $M_{тр}$. Можно выделить составляющие момента трения, связанные со свойствами поверхностей трения $M_{тр пов}$ (2), внешней нагрузкой $M_{тр внеш нагр}$ (3), свойствами смазочного материала $M_{тр смаз}$ (4) и электрохимического воздействия $M_{тр эл хим}$:

$$M_{тр пов} = M_{тр шер} + M_{тр хар из} + M_{тр св мат} + M_{тр темп}, \quad (2)$$

$$M_{тр внеш нагр} = M_{тр дав} + M_{тр реж}, \quad (3)$$

$$M_{тр смаз} = M_{тр сл см} + M_{тр прис}, \quad (4)$$

С учетом (2),(3) и (4), уравнение (1) принимает вид (5)

$$M_{тр} = M_{тр пов} + M_{тр внеш нагр} + M_{тр смаз} + M_{тр эл хим}, \quad (5)$$

Примером влияния электрохимической составляющей процесса трения двух прирабатываемых поверхностей могут служить результаты, полученные авторами в монографии [36]. Показана принципиальная возможность приработки и исправления макрогеометрии трущихся деталей путем электрохимико-механической приработки (ЭХМП), которая характерна для деталей ремонтируемых двигателей, и развития площади пятна контакта при сравнительно небольшом износе. Было выявлено, что на изменение макрогеометрии деталей оказывают влияние электрические параметры и режим нагружения их сопряжений.

Сила тока в сопряжении деталей является значимым фактором для ускорения процесса приработки. Причем, с увеличением перекося поршня в гильзе от четырех до шести раз превышающем зазор, эффективность наложенного электрического тока возрастала. Так, при четырехкратном перекося стабилизация момента трения при силе тока 5 и 8А, практически наступала после 3-х минут приработки, а с увеличением силы тока до 11А и выше момент трения стабилизировался на второй минуте проведения эксперимента (рис. 3).

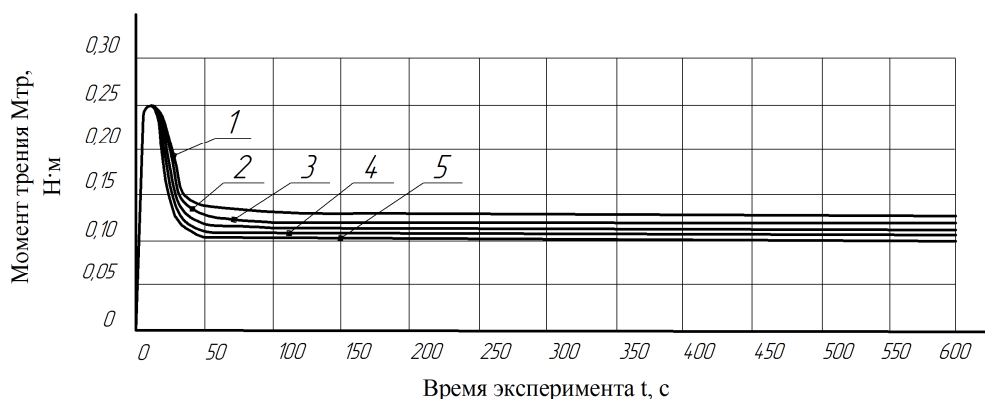


Рис. 3 – Характер изменения величины момента трения во времени при 4-х кратном перекося в сопряжении "поршень-гильза" при силе тока:

- 1 – 5А;
- 2 – 8А;
- 3 – 11А;
- 4 – 14А;
- 5 – 17А

Величина момента трения после стабилизации также зависела от силы заданного электрического тока: чем больше ток, тем меньше момент трения. Однако при этом величина снижения момента трения не пропорциональна увеличению силы тока.

Можно видеть, что в данных условиях приработки увеличение силы тока от 11 до 14 и 17А по истечении десяти минут опыта не вызывало существенного изменения момента трения. Это свидетельствует о том, что при ЭХМП увеличивать силу переменного тока свыше 14А не имеет смысла.

При шестикратном перекося в сопряжении деталей сила тока в 5А при ЭХМП не обеспечивала снижение момента трения, что свидетельствовало об усложнении процесса приработки сопряжения "ползун - гильза" (рис. 4).

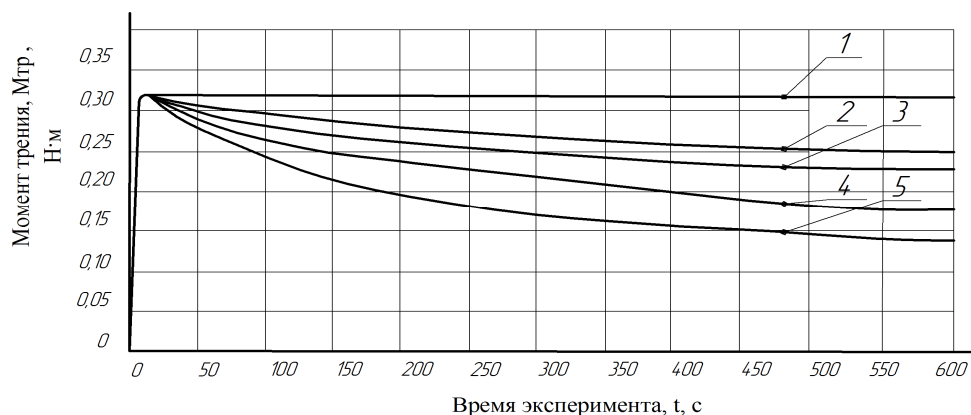


Рис. 4 – Характер изменения величины момента трения во времени при шестикратном перекусе в сопряжении "ползун - гильза" при силе тока:

- 1 – 5А;
- 2 – 8А;
- 3 – 11А;
- 4 – 14А;
- 5 – 17А

Применение метода ЭХМП имеет ряд существенных преимуществ перед другими видами окончательной обработки по эффективности снижения момента трения при приработке. В отличие от абразивной притирки при ЭХМП полностью исключается образование абразивных частиц в виде продуктов износа и других видов. Как и при электрохимическом полировании, при ЭХМП происходит снятие внутренних напряжений, как в микро-, так и макрообъеме поверхности материала. ЭХМП позволяет производить локальный сьем металла, но при этом отсутствуют пассивационные явления, характерные для электрохимической обработки. Кроме того метод ЭХМП обеспечивает совместную обработку деталей без применения специальных инструментов в отличие от абразивной и электрохимической обработок, благодаря этому происходит быстрая структурная, микро- и макрогеометрическая приспособляемость трущихся поверхностей, способствующая стабилизации момента трения в прирабатываемом сопряжении.

Выводы

1. На изменение момента трения $M_{тр}$, характеризующего различные процессы приработки влияет целый ряд факторов. К основным из них можно отнести следующие: 1 – изменение шероховатости, которая была сформирована при финишной обработке поверхности; 2 – изменение давления на прирабатываемых поверхностях в процессе приработки макрогеометрических отклонений; 3 – изменение режимов трения вследствие увеличения площади пятна контакта; 4 – изменение толщины разделяющего слоя смазки или рабочей среды; 5 – изменение интенсивности влияния электрохимических факторов процесса при использовании совмещенных методов приработки; 6 – изменение влияния присадок на прирабатываемые поверхности; 7 – изменение характера изнашивания поверхностей и удаления продуктов износа из зоны трения; 8 – от свойств материала деталей; 9 – от температуры в зоне трения.

2. Для правильной оценки совмещенных процессов в методе необходим системный подход, который связывает процессы механического активирования поверхностей с анодным травлением в условиях пассивации. Также необходимо учитывать сопутствующие процессы, одним из которых является газообразование в электролите. С его помощью можно значительно изменять несущую способность разделяющего слоя электролита в зазоре ресурсопределяющих сопряжений деталей и его электропроводимость. Газообразование при приработке напрямую зависит от поданного рабочего напряжения на сопряжение деталей и которое можно легко контролировать.

3. Определенно, что управление технологическими параметрами процесса приработки сопряжений агрегатов более легко осуществлять, изменяя относительную скорость и прилагаемую нагрузку, а откликом процесса является электрическое рабочее напряжение. Если оно ниже напряжения холостого хода, то скорость взаимного перемещения прирабатываемых поверхностей следует повысить, для создания минимальной раздельной пленки электролита, при которой эффективность приработки максимальна. В случае повышения рабочего напряжения до значений близких к напряжению холостого хода, целесообразно обеспечить минимальную раздельную пленку электролита повышением нагрузки. Напряжение процесса максимально, что обеспечивает анодное растворение, при исключении электроэрозии поверхности.

Литература

1. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія / В.В. Аулін. – Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф., 2014. – 370 с.
2. Дидур В.А. Трибологический подход к нормированию загрязненности смазочных масел. / В.А. Дидур, А.В. Дидур // Проблема трибологии. Международный научный журнал: Хмельницкий – 1996. – №2. – С.10-16.
3. Блау П.Д. Модель приработки и других переходных процессов в трении скольжения / П.Д. Блау // Проблемы трения и смазки. Труды американского общества инженеров-механиков. – 1988. – №2. – С. 108-116.
4. Боуден Ф. Трение и смазка. / Ф. Боуден, Д. Тейбор [пер. с англ.]. – М.: Машгиз, 1960. – 152 с.
5. Blau P.J., “ Interpretations of the Friction and Wear Break-in Behavior of Metals in Sliding Contact”. Wear, Vol.71, 1989, p.29-43.
6. Савченко Н.З. Исследование коэффициента трения в процессе приработки сопряженных деталей дизельных двигателей. / Н.З. Савченко, И.А. Кравец, Л.Ф. Вознюк // Исследования по механизации и электрификации сельского хозяйства: Сборник. – Вып.19. – К. : Изд-во УСХА, 1969. – С. 16-25.
7. Davis C.B., “Influence of Roughness and Oxidation of Wear of Lubricated Sliding Metal Surfaces”, Ann. N.Y. Acad. Sci., Vol.53, №4, 1951, p.919.
8. Davis F.A., and Eyre T.S. “ The effect of friction modifier on piston ring and cylinder bore friction and wear”. Tribology International, Vol.23, 1990, p. 163-172.
9. Рождественский Ю.Н. Опыт доводки шатунных подшипников тракторных двигателей типа 8ЧВН15/16 / Ю.Н. Рождественский, М.К. Ахтамов, Б.К. Балюк, Л.Н. Фалеев. // Двигателестроение. – 1988. – № 8. – С. 51-53.
10. Rowe G.W., “Surface Topographic Changes at Breakdown of Thin- film Lubrication”, Wear, Vol.28, 1974, p.125.
11. Ruff A.W., and Blau P.J., “Studies of Microscopic Aspects to Wear Processes in Metals”. Nat. Bur. of Standards, Report № NBSIR-80-2058, 1980.
12. Spalvins T., and Buzek B. “ Frictional and Morphological Characteristics of Ion-plated Soft Metallic Films”. Thin Solid Films, Vol. 84, №3,1981., p.266.
13. Алексеев В.П. Электрохимико-механическая макроприработка деталей / В.П. Алексеев // Монография. – Луганск: Элтон-2, 2011. – 204с.
14. Alan S. Brown. Flat, Cheap, and Under Control. IEEE Spectrum. – January 2005. – pp.40-45.
15. L. Economikos, X. Wang, A. Sakamoto, P. Ong, M. Naujok, R. Knarr, L. Chen, Y. Moon, S. Neo, J. Salfelder, A. Duboust, A. Manens, W. Lu, S. Shrauti, F. Liu, S. Tsai, W. Swart. Integrated Electro-Chemical Mechanical Planarization (ECMP) for Future Generation Device Technology. IEEE, 2004. – pp.233-235.
16. Yuan-Long Chen, Shu-Min Zhu, Shuo-Jen Lee and other. The technology combined electrochemical mechanical polishing. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003). – pp.203-205.
17. Yung-Fu Wu, Tzu-Hsuan Tsai. Effect of organic acids on copper chemical mechanical polishing. Microelectronic Engineering (2007). – pp.1-9.
18. Feng Gao. Tribo-electrochemical characterization of tantalum during electrochemical-mechanical polishing (ECMP): diss. ...PhD. Mechanical Engineering. - Texas A&M University. – 2010. – 145p.
19. Peter J. Blau. On the nature of running-in. Tribology International 38 (2005). – pp.1007-1012.
20. Canhua Li, Ishwara B. Bhat, Rongjun Wang, Joseph Seiler. Electro- Chemical Mechanical Polishing of Silicon Carbide. Journal of Electronic Materials, Vol.33, №5, 2004. – pp.481-486.
21. L. Economikos, X. Wang, A. Sakamoto, P. Ong, M. Naujok, R. Knarr, L. Chen, Y. Moon, S. Neo, J. Salfelder, A. Duboust, A. Manens, W. Lu, S. Shrauti, F. Liu, S. Tsai, W. Swart. Integrated Electro- Chemical Mechanical Planarization (ECMP) for Future Generation Device Technology. IEEE, 2004. – pp.233– 235.
22. Yair Ein- Eli, David Starosvetsky. Review on copper chemical- mechanical polishing (CMP) and post- CMP cleaning in ultra large system integrated (ULSI)- An electrochemical perspective. Electrochimica Acta 52 (2007). – pp.1825-1838.
23. Shuo-Jen Lee, Yu-Ming Lee, Ming-Feng Du. The polishing mechanism of electrochemical mechanical polishing technology. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003). – pp.280-286.
24. Milind Kulkarni, Dedy Ng, Melloy Baker and other. Electropotential-stimulated wear of copper during chemical mechanical planarization. Wear 263 (2007). – pp.1470-1476.
25. Jui-Chin Chen, Wen-Ta Tsai. Chemical- mechanical polishing behavior of tantalum in slurries

containing citric acid and alumina. *Surface & Coatings Technology* 185 (2004). – pp.50-57.

26. P.C. Goonetilleke, D. Roy. Electrochemical– mechanical planarization of copper: Effects of chemical additives on voltage controlled removal of surface layers in electrolytes. *Materials Chemistry and Physics* 94 (2005). – pp.388-400.

27. Samuel B. Emery, Jennifer L. Hubble, Maria A. Darling and other. Chemical factors for chemical-mechanical and electrochemical-mechanical planarization of silver examined using potentiodynamic and impedance measurements. *Materials Chemistry and Physics* 89 (2005). – pp.345-353.

28. Alan S. Brown. Flat, Cheap, and Under Control. *IEEE Spectrum*. – January 2005. – pp.40– 45.

29. Taras Zamota, Alexander Kravchenko, Viktor Aulin. Improvement of roughness at running insurfaces of details // Материалы шестнадцатой научно-технической конференции «Транспорт, экология – устойчиво развитие», сборник доклады, изд.-во ТУ - Варна. – 2010.- С.607-614.

30. Dick de Roover, Abbas Emami– Naeini, Jon L. Ebert. Model– Based Control for Chemical-Mechanical Planarization (CMP). *AACC 2004*. – pp.3922-3929.

31. D. Okumu Ouma, Duane S. Boning, James E. Chung and other. Characterization and Modeling of Oxide Chemical-Mechanical Polishing Using Planarization Length and Pattern Density Concepts. *IEEE 2002*. – pp.232-244.

32. Guanghui Fu, Abhijit Chandra, Sumit Guha, Ghatu Subhash. A Plasticity– Based Model of Material Removal in Chemical-Mechanical Polishing (CMP). *IEEE 2001*. – pp.406-417.

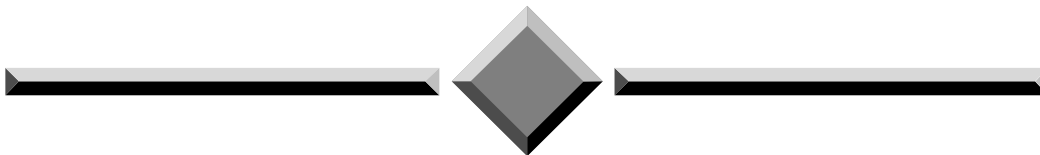
33. Furuchama S., Sumi T. A dynamic theory of piston-ring lubrication (3-rd report, Measurement of oilfilm thickness). *Bulletin of ISME- Vol. № 4.- № 16.- 1961*, pp.744-751.

34. Кузьменко А.Г. Дослідження зносоконтактної взаємодії змашених поверхонь тертя: Монографія. / А.Г. Кузьменко, О.В. Диха // – Хмельницький: ХНУ, 2005. – 183 с.

35. Дмитриченко Н.Ф. Смазочные процессы в условиях нестационарного трения: Монография / Н.Ф. Дмитриченко, Р.Г. Мацаканов. – Житомир: ЖИТИ, 2002. – 308 с.

36. Замота Т.Н. Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: Монография / Т.Н. Замота, В.В. Аулин. – Кировоград: Издатель Лысенко В.Ф. – 2015. – 304 с.

Поступила в редакцію 22.12.2017



Проблеми трибології “Problems of Tribology”

E-mail: tribosenator@gmail.com

Aulin V., Zamota T., Lysenko S., Hrynkiv A., Chernai A. **Tribology transitions at running-in of friction surfaces conjugate parts.**

Running-in is the process of difficult tribology transitions of surfaces of friction from the new state (after making or repair) to running-in one. Completion of running-in comes after stabilizing of basic tribotechnical descriptions of surfaces and parameters of process of friction. Testifies conformity to law of running-in that investigating flowing of processes is possible three basic methods: on measuring of moment of friction; at times passing of interface to the stable state; on descriptions of short-term changes of force of friction. Determination of basic conformities to law will allow to promote efficiency of running-in of friction surfaces of details of machines.

Key words: runoff, friction torque, macrogeometry, contact of conjugate surfaces, effect unerringness.

References

1. Aulin V.V. Fizychni osnovy procesiv i staniv samoorganizacii' v trybotechnichnyh systemah: monografija. V.V. Aulin. Kirovograd: Vyd. Lysenko V.F., 2014. 370 s.
2. Didur V.A. Tribologicheskij podhod k normirovaniju zagryaznennosti smazochnyh masel. V.A. Didur, A.V. Didur. Problema tribologii. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal: Hmel'nickij. 1996. №2. S.10-16..
3. Blau P.D. Model' prirabotki i drugih perehodnyh processov v trenii skol'zhenija. P.D. Blau. Problemy trenija i smazki. Trudy amerikanskogo obshhestva inzhenerov-mehanikov. 1988.- №2. S.108-116.
4. Bouden F. Trenie i smazka. F. Bouden, D. Tejbor [per. s angl.]. M.: Mashgiz, 1960. 152s.
5. Blau P.J., " Interpretations of the Friction and Wear Break-in Behavior of Metals in Sliding Contact". Wear, Vol.71, 1989, p.29-43.
6. Savchenko N.Z. Issledovanie koeficienta trenija v processe prirabotki soprjazhennyh detalej dizel'nyh dvigatelej. / N.Z. Savchenko, I.A. Kravec, L.F. Voznjuk. Issledovanija po mehanizacii i jelektrifikacii sel'skogo hozjajstva: Sbornik. Vyp.19. Kiev: Izd-vo USHA, 1969. S.16-25.
7. Davis C.B., "Influence of Roughness and Oxidation of Wear of Lubricated Sliding Metal Surfaces", Ann. N.Y. Acad. Sci., Vol.53, №4, 1951, p.919.
8. Davis F.A., and Eyre T.S. " The effect of friction modify on piston ring and cylinder bore friction and wear". Tribology International, Vol.23, 1990, p. 163-172.
9. Rozhdestvenskij Ju.N. Opyt dovodki shatunnyh podshipnikov traktornyh dvigatelej tipa 8ChVN15/16. / Ju.N. Rozhdestvenskij, M.K. Ahtamov, B.K. Baljuk, L.N. Faleev. Dvigatellestroenie. 1988. №8. S.51-53.
10. Rowe G.W., "Surface Topographic Changes at Breakdown of Thin- film Lubrication", Wear, Vol.28, 1974, p.125.
11. Ruff A.W., and Blau P.J., "Studies of Microscopic Aspects to Wear Processes in Metals". Nat. Bur. of Standards, Report № NBSIR-80-2058, 1980.
12. Spalvins T., and Buzek B. "Frictional and Morphological Characteristics of Ion-plated Soft Metallic Films". Thin Solid Films, Vol. 84, №3, 1981., p.266.
13. Alekseev V.P. Jelektrohimičko-mehaničeskaja makropirabotka detalej. V.P. Alekseev. Monografija. Lugansk: Jelton-2, 2011. 204s.
14. Alan S. Brown. Flat, Cheap, and Under Control. IEEE Spectrum. January 2005. pp.40-45.
15. L. Economikos, X. Wang, A. Sakamoto, P. Ong, M. Naujok, R. Knarr, L. Chen, Y. Moon, S. Neo, J. Salfelder, A. Duboust, A. Manens, W. Lu, S. Shrauti, F. Liu, S. Tsai, W. Swart. Integrated Electro-Chemical Mechanical Planarization (ECMP) for Future Generation Device Technology. IEEE, 2004. pp.233-235.
16. Yuan-Long Chen, Shu-Min Zhu, Shuo-Jen Lee and other. The technology combined electrochemical mechanical polishing. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003). pp.203-205.
17. Yung-Fu Wu, Tzu-Hsuan Tsai. Effect of organic acids on copper chemical mechanical polishing. Microelectronic Engineering (2007). pp.1-9.
18. Feng Gao. Tribo-electrochemical characterization of tantalum during electrochemical-mechanical polishing (ECMP): diss. ...PhD. Mechanical Engineering. Texas A&M University. 2010. 145p.
19. Peter J. Blau. On the nature of running- in. Tribology International 38 (2005). pp.1007-1012.
20. Canhua Li, Ishwara B. Bhat, Rongjun Wang, Joseph Seiler. Electro-Chemical Mechanical Polishing of Silicon Carbide. Journal of Electronic Materials, Vol.33, №5, 2004. pp.481-486.
21. L. Economikos, X. Wang, A. Sakamoto, P. Ong, M. Naujok, R. Knarr, L. Chen, Y. Moon, S. Neo, J. Salfelder, A. Duboust, A. Manens, W. Lu, S. Shrauti, F. Liu, S. Tsai, W. Swart. Integrated Electro-Chemical Mechanical Planarization (ECMP) for Future Generation Device Technology. IEEE, 2004. pp.233-235.
22. Yair Ein-Eli, David Starosvetsky. Review on copper chemical-mechanical polishing (CMP) and post- CMP cleaning in ultra large system integrated (ULSI)- An electrochemical perspective. Electrochimica Acta 52 (2007). pp.1825-1838.

23. Shuo-Jen Lee, Yu-Ming Lee, Ming-Feng Du. The polishing mechanism of electrochemical mechanical polishing technology. *Journal of Materials Processing Technology* 140 (2003). pp.280-286.
24. Milind Kulkarni, Dedy Ng, Melloy Baker and other. Electropotential-stimulated wear of copper during chemical mechanical planarization. *Wear* 263 (2007). pp.1470-1476.
25. Jui-Chin Chen, Wen-Ta Tsai. Chemical-mechanical polishing behavior of tantalum in slurries containing citric acid and alumina. *Surface & Coatings Technology* 185 (2004). pp.50-57.
26. P.C. Goonetilleke, D. Roy. Electrochemical– mechanical planarization of copper: Effects of chemical additives on voltage controlled removal of surface layers in electrolytes. *Materials Chemistry and Physics* 94 (2005). pp.388-400.
27. Samuel B. Emery, Jennifer L. Hubble, Maria A. Darling and other. Chemical factors for chemical-mechanical and electrochemical-mechanical planarization of silver examined using potentiodynamic and impedance measurements. *Materials Chemistry and Physics* 89 (2005). pp.345-353.
28. Alan S. Brown. Flat, Cheap, and Under Control. *IEEE Spectrum*. January 2005. pp.40-45.
29. Taras Zamota, Alexander Kravchenko, Viktor Aulin. Improvement of roughness at running insurfaces of details // *Materialy shesnadesetata nauchno-tehnicheska konferencija «Transport, ekologija – ustojchivo razvitie»*, sbornik dokladi, izd.-vo TU. Varna. 2010. S.607 – 614.
30. Dick de Roover, Abbas Emami– Naeini, Jon L. Ebert. Model– Based Control for Chemical– Mechanical Planarization (CMP). *AACC* 2004. pp.3922– 3929.
31. D. Okumu Ouma, Duane S. Boning, James E. Chung and other. Characterization and Modeling of Oxide Chemical– Mechanical Polishing Using Planarization Length and Pattern Density Concepts. *IEEE* 2002. pp.232– 244.
32. Guanghui Fu, Abhijit Chandra, Sumit Guha, Ghatu Subhash. A Plasticity– Based Model of Material Removal in Chemical– Mechanical Polishing (CMP). *IEEE* 2001. pp.406– 417.
33. Furuchama S., Sumi T. A dynamic theory of piston-ring lubrication (3-rd report, Measurement of oilfilm thickness). *Bulletin of ISME*. Vol.№ 4. №16. 1961, pp.744-751.
34. Kuz'menko A.G. *Doslidzhennja znosokontaktnoi' vzajemodii' z mashennyh poverhon' tertja: Monografija.* / A.G. Kuz'menko, O.V. Dyha. Hmel'nyckyj: HNU, 2005. 183 s.
35. Dmitrichenko N.F. *Smazochnye processy v uslovijah nestacionarnogo trenija: Monografija.* N.F. Dmitrichenko, R.G. Macakanov. Zhitomir: ZhITI, 2002. 308 s.
36. Zamota T.N. *Upravlenie processami prirabotki osnovnyh soprjazhenij detalej mashin pri izgotovlenii i remonte: Monografija.* T.N. Zamota, V.V. Aulin. Kirovograd: Izdatel' Lysenko V.F. 2015. 304 s.