

Замота Т.Н.Восточноукраинский национальный
университет им.В.Далы,
г. Луганск, Украина**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЦЕССА МАКРОПРИРАБОТКИ
ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ
ПРИ ЭХМП(Д)****Введение**

Проблема повышения долговечности сопряжений не может быть решена без качественной доводки пар трения. Одним из направлений в доводке и сокращении времени обкатки является электрохимико-механическая приработка(доводка)(ЭХМП(Д)) [1]. При ЭХМП(Д) деталям механизма придается рабочее движение, между деталями прокачивается электролит и пропускаем переменный электрический ток. За счет совместного электрохимико-механического воздействия происходит быстрое приспособление одной поверхности к другой. Наиболее эффективным фактором ЭХМП(Д) является электрохимический [2, 3, 4].

Применение электрохимико-механической приработки (доводки) имеет ряд существенных преимуществ перед другими видами окончательной обработки. В отличие от абразивной притирки (доводки) при ЭХМП(Д) полностью исключается образование абразивных частиц в виде продуктов износа и других видов так как воздействие на материал производится наложением тока на среду и детали и происходит на тонком уровне, в результате чего продукты съема находятся в среде в виде атомов, молекул. Как и при электрохимическом полировании, при ЭХМП(Д) происходит снятие внутренних напряжений как в микро-, так и макрообъеме поверхности материала. ЭХМП(Д) позволяет производить локальный съем металла. Кроме того, ЭХМП(Д) 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.

Постановка задачи макрогеометрической приработки при ЭХМП(Д)

Для теоретического исследования процесса ЭХМП(Д) составим схему макрогеометрической приработки двух непараллельных поверхностей трения. Каждой поверхности заданы определенные свойства, влияющие на ее износостойкость. Требуется обеспечить за счет процесса электрохимико-механической приработки эквидистантность поверхностей с минимально возможным износом. Минимально возможный износ, для обеспечения эквидистантности поверхностей, может быть легко вычислен, зная величину углов перекосов γ и ϕ (рис. 1).

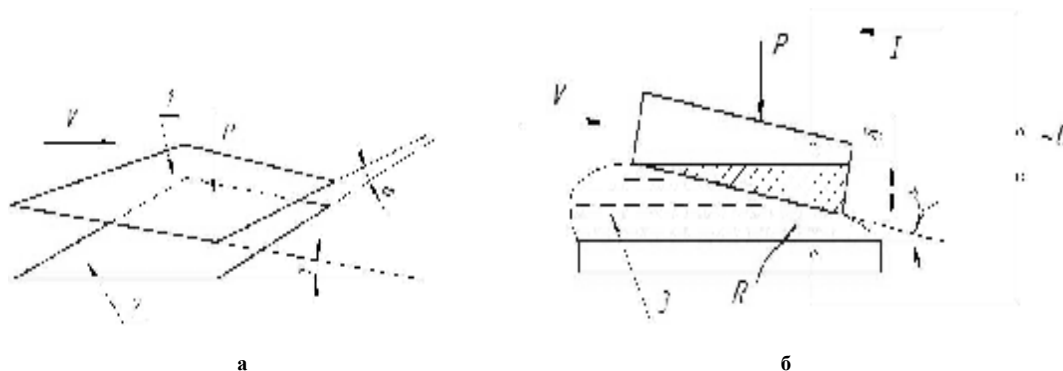


Рис. 1 – Общая схема макрогеометрической приработки сопряженных поверхностей:

а – общий случай неэквидистантности плоских поверхностей;

б – частный случай(при отсутствии поперечного перекоса);

1 – поверхность 1; **2** – поверхность 2; **3** – смазочная среда;

P – давление; **V** – скорость взаимного перемещения; **I, R** – токовые параметры процесса;

δ – толщина изнашиваемого материала, γ, ϕ – углы перекоса

При этом необходимо учитывать механическую составляющую процессов (давление в контакте P , скорость взаимного перемещения V и электрохимическую (состав электролита, режим трения, токовые параметры), непосредственно влияющих на съем материала трущихся поверхностей. Учитывая предыдущие исследования [5 ... 7] с достаточным приближением, эту задачу можно решить для одной поверхности постоянного контактирования. В данном случае - это поверхность 1. Поэтому дальнейшие теоретические разработки необходимо проводить с учетом того, что поверхность 1 будет изнашиваться в процессе приработки, а поверхность 2 – сохранять свою первоначальную геометрическую форму.

Распределение тока между обрабатываемыми поверхностями

При электрохимико-механическом взаимодействии двух деталей будут протекать два взаимодополняющих процесса, приводящих к выравниванию поверхности: электрохимическое травление и механическая депассивация поверхности. Интенсивность съема металла с обрабатываемой поверхности будет пропорциональна силе тока, протекающего через конкретную точку (рис. 2).

На схеме, представленной на рис. 2, а выделены две цепи, по которым может протекать ток при ЭХМП(Д). В обеих цепях присутствуют два равных между собой сопротивления: R_a – сопротивление анода и R_k – сопротивление катода.

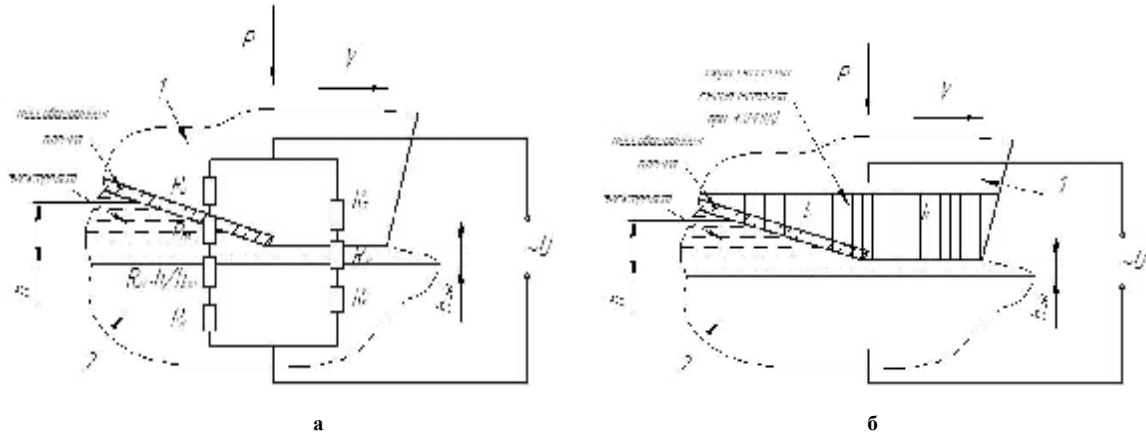


Рис. 2 – Распределение сопротивлений протеканию тока при ЭХМП(Д) сопряженных деталей с макрогеометрическими отклонениями (а) и эпюра скорости съема металла при ЭХМП(Д) (б) :
 1 – деталь 1; 2 – деталь 2; h_{min} – толщина минимального слоя электролита в зоне механической депассивации;
 h – толщина слоя электролита в зоне макрогеометрического отклонения; R_a – сопротивление анода;
 R_k – сопротивление катода; $R_{эл}$ – сопротивление минимального слоя электролита;
 $R_{эл} \cdot h/h_{min}$ – сопротивление слоя электролита в зоне макрогеометрического отклонения;
 $R_{пл}$ – сопротивление пассивационной пленки

Определяющими же для протекания электрохимической реакции являются сопротивления непосредственно связанные с зазором: сопротивление минимального слоя электролита – $R_{эл}$, сопротивление слоя электролита в зоне макрогеометрического отклонения – $R_{эл} \cdot h/h_{min}$ и сопротивление пассивационной пленки $R_{пл}$.

Обозначим силу тока, проходящего через минимальный слой электролита в зоне механической депассивации, I_1 , а силу тока в зоне макрогеометрического отклонения – I_2 . Без учета одинаковых для обеих цепей сопротивлений можно записать:

$$I_1 = U / R_{эл}; \quad I_2 = \frac{U}{R_{эл} h / h_{min} + R_{пл}}. \quad (1)$$

Очевидно, что сила тока $I_1 > I_2$, т.е. скорость электрохимического травления больше в зоне минимального слоя электролита и отсутствия пассивационной пленки. Необходимо выразить силу тока в зоне макрогеометрического отклонения I_2 через I_1 . Для этого запишем:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{эл} h / h_{min} + R_{пл}}{R_{эл}}. \quad (2)$$

Отсюда

$$I_2 = \frac{I_1}{h / h_{min} + R_{пл} / R_{эл}}. \quad (3)$$

С учетом формул (1) и (3) для межэлектродного зазора равного толщине слоя электролита в каждой конкретной точке построена эпюра скорости съема металла при ЭХМП(Д) (рис. 2, б). При ЭХМП(Д) создаются условия для эффективного выравнивания поверхностей с макрогеометрическими отклонениями. При сравнении сил тока I_1 и I_2 определяющими будут макрогеометрический (h/h_{min}) и

электрохимический ($R_{пл}/R_{эл}$) факторы. С ростом напряжения процесса U происходит линейное возрастание силы тока. Верхняя прямая на рис. 3 показывает силу тока I_1 . Три нижних – силу тока I_2 при h/h_{\min} равном 2, 3 и 4, соответственно. На рис. 3, а принято, что $R_{пл}/R_{эл}$ равно единице, а на рис. 3, б сопротивление $R_{пл}$ в пять раз больше $R_{эл}$.

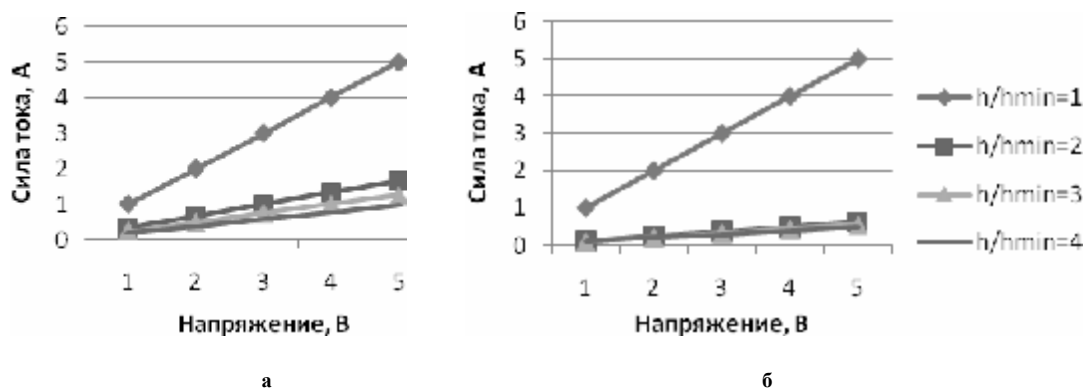


Рис. 3 – Изменение силы тока при ЭХМП(Д) на участках детали с учетом межэлектродного зазора(а) и межэлектродного зазора и пассивационной пленки(б)

Очевидно, что при анодном растворении поверхности, ее выравнивание будет зависеть от разницы силы тока I_1 и I_2 . Чем больше эта разница, тем быстрее и эффективнее процесс уменьшения макрогеометрического отклонения. Напряжение процесса должно быть максимальным, при котором обеспечивается анодное растворение, но исключается электроэрозия поверхности. По данным исследований [1 ... 3] U должно находиться в пределах 3,5 ... 4,5 В. Наличие пассивационной пленки только ускоряет выравнивание поверхности, поэтому необходимо подбирать электролит с пассивирующими свойствами.

Теоретическая модель, описывающая уменьшение макрогеометрической погрешности при ЭХМП(Д) плоских поверхностей

Толщина смазочного слоя между трущимися поверхностями в зоне непосредственного контакта равна $h_i = h_{\min}$, а в зоне макрогеометрического отклонения – $h_i = h$.

Анодное травление в каждой конкретной точке происходит с определенной скоростью обратно пропорциональной величине межэлектродного зазора h . В начальный момент времени точка поверхности детали с макрогеометрическим отклонением находится на зазоре $h_i = h_{\min}$ и имеет скорость травления V_a . Составим дифференциальное уравнение изменения линейного износа по времени. Обозначим межэлектродный зазор через $h = h(t)$ – расстояние точки от начала отсчета в момент времени t , тогда в зоне непосредственного контакта $h(0) = h_{\min}$. Согласно условию, изменение величины h от времени описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k}{h}, \quad (4)$$

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k), \quad (5)$$

где $1/2$ – коэффициент, учитывающий анодный полупериод переменного тока, при котором происходит травление одной из деталей сопряжения;

U – рабочее напряжение;

φ_a – анодный потенциал;

φ_k – катодный потенциал;

η_a – анодный выход по току;

χ – удельная электропроводимость электролита;

ρ – плотность материала;

ε – электрохимический эквивалент материала анода.

Разделив переменные в этом уравнении и проинтегрировав его, получим:

$$h = \sqrt{2(kt + c)}. \quad (6)$$

Из условия $h(0) = h_{\min}$ определим постоянную интегрирования c :

$$c = h_{\min}^2 / 2. \quad (7)$$

Тогда можем записать следующее выражение:

$$h = \sqrt{2\left(kt + \frac{h_{\min}^2}{2}\right)} = \sqrt{h_{\min}^2 + 2kt}. \quad (8)$$

Дифференцируя по t , найдем скорость увеличения зазора h в момент времени t :

$$V(t) = \frac{dh}{dt} = \frac{k}{\sqrt{h_{\max}^2 + 2kt}}, \quad (9)$$

Подставим в эту функцию значение k для зоны непосредственного контакта, что даст возможность определить функцию скорости увеличения зазора между деталями.

$$V(t) = \frac{dh}{dt} = \frac{k}{\sqrt{h_i^2 + 2kt}} = \frac{\frac{1}{2} \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k)}{\sqrt{h_i^2 + \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t}}. \quad (10)$$

Изменение зазора в каждой конкретной точке в зависимости от времени выразится следующим выражением:

$$h = \sqrt{h_i^2 + 2kt} = \sqrt{h_i^2 + \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t}. \quad (11)$$

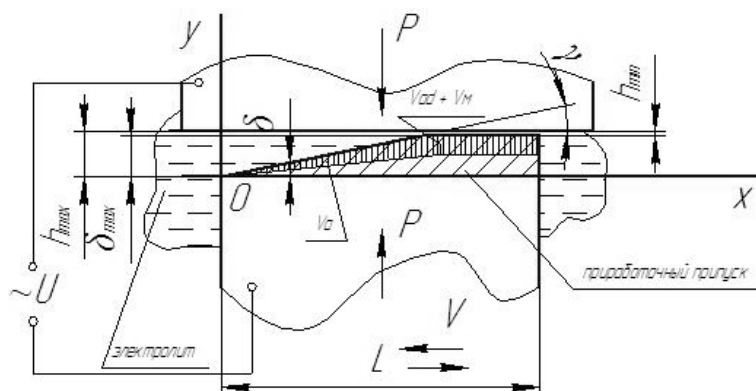


Рис. 4 – Расчетная схема распределения зазоров при приработке поверхности с макрогеометрическим отклонением

Учитывая то, что толщина смазочного слоя в зоне непосредственного контакта постоянна при неизменных условиях, получим:

$$h = \sqrt{h_{\min}^2 + 2kt} = \sqrt{h_{\min}^2 + \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t}. \quad (12)$$

По заданным условиям можно записать следующее:

$$h_{\max} = h_{\min} + \delta_{\max} - \delta, \quad (13)$$

где δ – величина макрогеометрического отклонения (рис. 4), зависящая от координаты x ($\delta = f(x)$).

На схеме, представленной на рис. 4, увеличение макрогеометрического отклонения имеет линейный характер, поэтому:

$$\delta = ax + c, \quad (14)$$

где a и c – постоянные прямой, зависящие от угла перекоса γ и линейных размеров детали;
 x – координата сечения детали от максимального зазора.

С учетом (14), получим:

$$h_i = h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c. \quad (15)$$

Тогда изменение зазора в зоне макрогеометрического отклонения равно:

$$h = \sqrt{(h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + 2kt} = \sqrt{(h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t}. \quad (16)$$

Проинтегрировав это выражение по x , получим площадь эпюры изменения сечения детали в определенный момент времени:

$$S_{\text{эп}h} = \int_{x=0}^{x=L} \sqrt{(h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t} \cdot dx. \quad (17)$$

Объем снимаемого материала будет зависеть от ширины детали b :

$$V_{\text{эп}h} = b \int_{x=0}^{x=L} \sqrt{(h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t} \cdot dx. \quad (18)$$

Выводы

1. Получена математическая модель, описывающая уменьшение макрогеометрической погрешности при ЭХМП(Д) плоских поверхностей.
2. Процесс ЭХМП(Д) можно контролировать электрохимическими и механическими факторами, влияющими на толщину минимального слоя электролита h_{\min} , его электропроводимость χ и пассивирующие свойства, формирующих $R_{\text{эл}}$ – сопротивление минимального слоя электролита; $R_{\text{эл}} \cdot h/h_{\min}$ – сопротивление слоя электролита в зоне макрогеометрического отклонения и $R_{\text{пл}}$ – сопротивление пассивационной пленки.
3. При анодном растворении поверхности, ее выравнивание будет зависеть от разницы силы тока I_1 и I_2 . Чем больше эта разница, тем быстрее и эффективнее процесс уменьшения макрогеометрического отклонения.
4. Напряжение процесса должно быть максимальным, при котором обеспечивается анодное растворение, но исключается электроэрозия поверхности (U должно находиться в пределах 3,5 ... 4,5В).
5. Наличие пассивационной пленки только ускоряет выравнивание поверхности, поэтому необходимо подбирать электролит с пассивирующими свойствами.

Литература

1. Алексеев В.П. Стадии электрохимико-механической прироботки (доводки) сопряжения вал – подшипник скольжения/ В.П. Алексеев // Авиационно-космическая техника и технология. Тр. Харьковского авиационного института им. Жуковского. – ХАИ. – 1998. – С. 475-485.
2. Taras Zamota, Alexander Kravchenko. Electrochemical-mechanical running in of the main engine's conjugations//ТЕКА, Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture.-Vol. XD.-Lublin,2010.-P.58-65.
3. Taras Zamota, Alexander Kravchenko. Improvement of tribotechnical characteristics of piston ring surfase at running in//ТЕКА, Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture.-Vol. XB.-Lublin,2010.-P.323-330.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

Надійшла 18.02.2011