

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

С целью достижения высокой чистоты и точности поверхности в процессе производства и ремонта все большее количество металлических деталей нуждаются в полировании и выравнивании. Электрохимико-механическое полирование основано на совместном электрохимическом и механическом воздействии на рабочие поверхности деталей. С помощью этого вида полирования достигается высокая чистота поверхности и эффективность процесса, используется простое оборудование и способ находит широкое применение [1]. Одним из направлений в доводке сопряженных механизмов и сокращении времени обкатки агрегатов является электрохимико-механическая приработка (доводка) (ЭХМП(Д)) [2, 3].

Целью данной работы является выявление механизма приработки плоских поверхностей при ЭХМП(Д), построение математической модели взаимосвязи его параметров и практическая реализация построенной модели

Механизм ЭХМП(Д)

Принцип электрохимико-механической приработки (доводки) можно понять из рис. 1. Деталю механизма придается рабочее движение, между ними прокачивается электролит и пропускается переменный электрический ток. Благодаря этому каждая из деталей попеременно становится анодом и катодом с частотой 50 Гц. В анодный полупериод происходит электрохимическое травление поверхности, которое зависит от свойств электролита, режима трения и токовых параметров процесса.

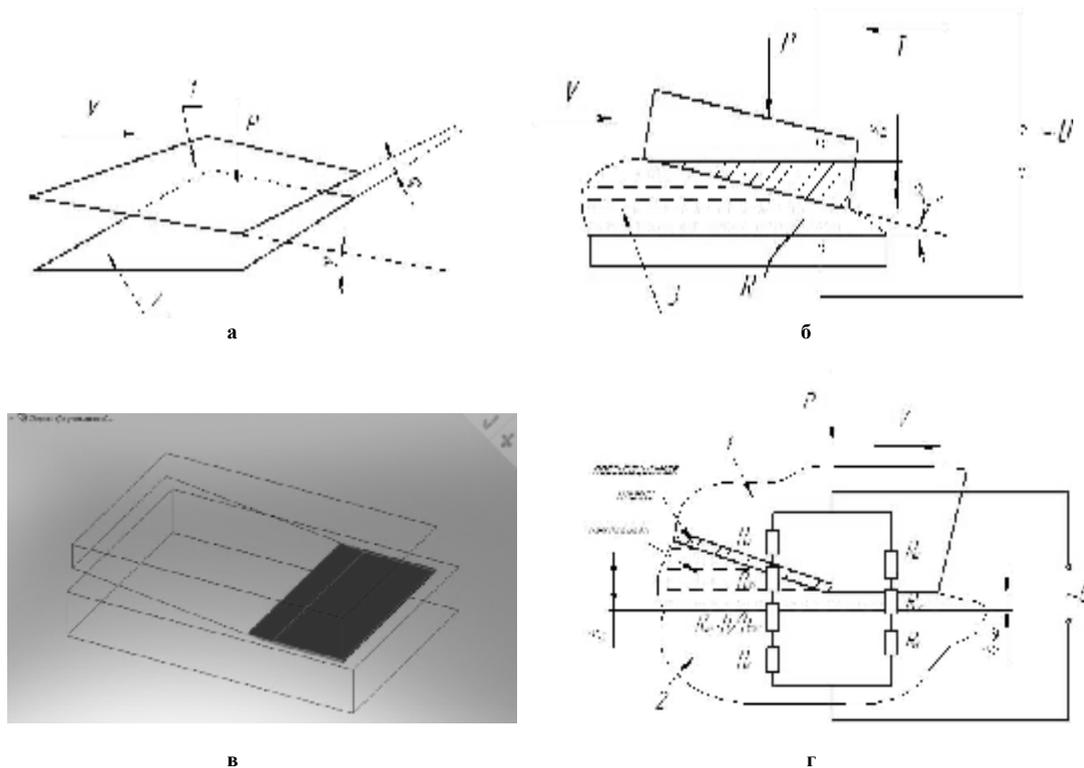


Рис. 1 – Схема макрогеометрической приработки сопряженных поверхностей:

а – общий случай неэквидистантности плоских поверхностей;

б – частный случай (при отсутствии поперечного перекоса); в – приработочная зона;

1 – поверхность 1; 2 – поверхность 2; 3 – смазочная среда; P – давление; V – скорость взаимного перемещения;

U, I, R – токовые параметры процесса; δ – толщина изнашиваемого материала; γ, φ – углы перекоса;

h_{min} – толщина минимального слоя электролита в зоне механической депассивации; R_a – сопротивление анода;

h – толщина слоя электролита в зоне макрогеометрического отклонения; R_k – сопротивление катода;

R_{nl} – сопротивление минимального слоя электролита;

$R_{nl} \cdot h / h_{min}$ – сопротивление слоя электролита в зоне макрогеометрического отклонения;

R_{nl} – сопротивление пассивационной пленки

В отличие от электрохимического полирования при ЭХМП(Д) применяются вязкие электролиты, обеспечивающие разделение трущихся поверхностей при гидродинамическом и хорошие смазывающие способности при переходном и граничном режимах трения. За счет совместного электрохимико-механического воздействия происходит быстрое приспособливание одной поверхности к другой. Наиболее эффективным фактором ЭХМП(Д) является электрохимический [2, 4, 5].

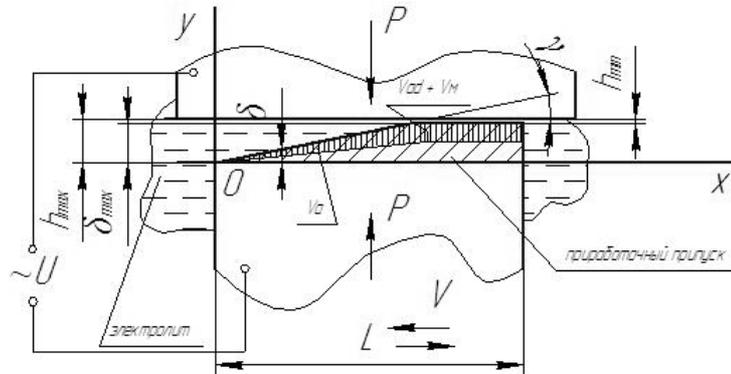


Рис. 2 – Расчетная схема распределения зазоров при приработке поверхности с макрогеометрическим отклонением

Как видно из рис. 2, на поверхности детали можно выделить следующие характерные участки: макрогеометрического отклонения сохранения эквидистантности поверхностей. На первом участке (в месте просвета) при ЭХМП(Д) происходит только процесс анодного растворения (V_a), а на втором - периодически чередуются акты механического активирования и анодного растворения ($V_m + V_{ad}$). Приработка детали заканчивается когда максимальный припуск δ_{\max} уменьшится до нуля. При этом необходимо обеспечить снятие приработочного припуска, обозначенного на рис. 2 штриховкой. Очевидно, что при больших съемах с детали, приработка будет сопряжена с повышенными износами при ЭХМП(Д). Снижение приработочного износа возможно за счет увеличения скорости съема металла на участке механического активирования ($V_m + V_{ad}$) по отношению к скорости съема в зоне просвета, где активирование поверхности отсутствует (V_a). Для упрощения примем, что скорость выравнивания погрешности V_{\max} равна:

$$V_{\max} = \frac{d\delta_{\max}}{dt} = V_m + V_{ad} - V_a, \quad (1)$$

где ($V_m + V_{ad}$) и (V_a) – соответственно скорости съема металла на участке механического активирования и анодного растворения;

V_{ad} – скорость анодного растворения металла при механической депассивации.

Анодное травление V_a в каждой конкретной точке происходит с определенной скоростью обратно пропорциональной величине межэлектродного зазора h . Толщина смазочного слоя между трущимися поверхностями в зоне непосредственного контакта равна $h_i = h_{\min}$, а в зоне макрогеометрического отклонения – $h_i = h$. В начальный момент времени локальная область поверхности детали с макрогеометрическим отклонением находится на зазоре $h_i = h_{\min}$ и имеет скорость травления V_a . Обозначим межэлектродный зазор через $h = h(t)$ – расстояние локальной области от начала отсчета в момент времени t , тогда в зоне непосредственного контакта $h(0) = h_{\min}$. Согласно условию, изменение величины макрогеометрической погрешности h от времени можно описать дифференциальным уравнением:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k}{h}, \quad (2)$$

$$\text{где} \quad k = \frac{1}{2} \cdot (1 - k_1) \cdot \frac{x\varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k); \quad (3)$$

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

k_1 – коэффициент, учитывающий учитывающий долю граничного трения ($S_m < 10^{-5}$) в общем времени цикла;

U – рабочее напряжение, В;

φ_a – анодный потенциал, В;

φ_k – катодный потенциал, В;

η_a – анодный выход по току, %;

χ – удельная электропроводимость электролита, Ом⁻¹·см⁻¹;

ρ – плотность материала, г/см³;

ε – электрохимический эквивалент материала анода, г/А·ч.

Величину зазора в области макрогеометрического отклонения с течением времени можно оценить по формуле:

$$h = \sqrt{(h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + 2kt} = \sqrt{(h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + (1 - k_1) \cdot \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t}, \quad (4)$$

где a и c – постоянные прямой линии характеризующей макрогеометрическое отклонение, и зависящие от угла перекося γ и линейных размеров детали;

x – координата сечения детали от максимального зазора (рис. 2).

Минимально возможный объемный износ для обеспечения эквидистантности поверхностей, с учетом анодного растворения зависит от ширины детали b :

$$V_{\text{эн}h} = b \int_{x=0}^{x=L} \sqrt{(h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + (1 - k_1) \cdot \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t} \cdot dx, \quad (5)$$

При этом скорость анодного съема материала с поверхности детали в каждой конкретной локальной области с учетом формул (2) и (3), описывается следующим выражением:

$$V_a = \frac{dh}{dt} = 1/2 \cdot (1 - k_1) \cdot \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) / \sqrt{(h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + (1 - k_1) \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t}. \quad (6)$$

Составляющую скорости анодного растворения материала V_{ad} можно определить исходя из законов Фарадея и Ома [8] с учетом периодического прерывания анодного растворения в рассматриваемой локальной области поверхности, вследствие падения напряжения при механическом активировании (в зонах граничного трения). По аналогии со скоростью анодного растворения V_a составляющая V_{ad} равна:

$$V_{ad} = \frac{dh}{dt} = 1/2 \cdot (1 - k_1) \cdot \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_{ad} (U - \varphi_{ad} + \varphi_k) / \sqrt{h_{\min}^2 + (1 - k_1) \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_{ad} (U - \varphi_{ad} + \varphi_k) \cdot t}, \quad (7)$$

Подставив выражения (6) и (7) в (1), получим зависимость скорости выравнивания макрогеометрической погрешности V_{\max} от электрохимико-механических параметров процесса:

$$V_{\max} = V_m + 1/2 \cdot (1 - k_1) \cdot \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot (\eta_{ad} (U - \varphi_{ad} + \varphi_k) / \sqrt{h_{\min}^2 + (1 - k_1) \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_{ad} (U - \varphi_{ad} + \varphi_k) \cdot t} - \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) / \sqrt{(h_{\min}^2 + \delta_{\max} - ax - c)^2 + (1 - k_1) \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t}). \quad (8)$$

Отсюда следует, что скорость уменьшения макрогеометрической погрешности, кроме механического (V_m) и геометрического (δ), зависит от электрохимических факторов, таких как удельная электропроводимость χ , значения анодных потенциалов φ_{ad} , φ_a и выходов по току η_{ad} , η_a . Механическое активирование снижает анодный потенциал [8]. Подтверждение того, что анодный выход по току возрастает в результате периодического механического воздействия, имеется в работах [5 ... 7].

Таким образом, выбор режимов ЭХМП(Д) можно осуществить на основе информации о величинах φ_{ad} , φ_a , η_{ad} , η_a при определенных условиях приработки. Ускорению приработки поверхностей способствует уменьшение коэффициента k_1 , который выражает долю граничного трения в общем времени цикла. В свою очередь, k_1 зависит от критерия Зоммерфельда S_m .

Толщина пленки h_{\min} , разделяющая прирабатываемые поверхности, также является функцией скорости перемещения V и динамической вязкости μ , однако увеличение h_{\min} приведет к повышению переходного сопротивления слоя электролита.

Исходя из формулы (8) для увеличения скорости приработки поверхности детали необходимо, чтобы величина h_{\min} была минимальной и обеспечивались условия гидродинамической смазки. Снижение несущей способности электролита, с целью уменьшения h_{\min} , возможно за счет газообразования. При электрохимико-механической приработке (доводке) электролит заполняется пузырьками газа за счет электрохимических процессов, протекающих на поверхностях трибосопряжений. Газообразование зависит от токовых параметров. Поток газа с жидкостью обладает высокой степенью сжимаемости [7], что может быть использовано для уменьшения h_{\min} в процессе приработки с использованием ЭХМП(Д). Некоторое количество пузырьков газа будет способствовать локализации процесса анодного растворения, которая широко применяется во многих технологических схемах электрохимической размерной обработки деталей машин [7, 8].

Применяемые электролиты и их характеристик

Экспериментальные исследования свидетельствуют, что при ЭХМП(Д) поверхностей трения целесообразно использовать следующие составы электролитов:

- смесь глицерина с 20 % водным раствором NaCl в соотношении четыре объемных частей глицерина и одна объемная часть раствора хлорида натрия (состав № 1);
- смесь глицерина с 20 % водным раствором NaNO₃ в соотношении четыре объемных частей глицерина и одна объемная часть раствора нитрата натрия (состав № 2);
- смесь глицерина с 20 % водным раствором Na₂CO₃ в соотношении 84 % глицерина и 16 % раствора карбоната натрия (состав № 3);
- смесь глицерина с 20 % водным раствором Na₂CO₃ в соотношении 84 % глицерина и 16 % раствора карбоната натрия и добавлением 4 % олеиновой кислоты (состав № 4).

Выявлено, что удельная электропроводимость электролита χ зависит от содержания глицерина и олеиновой кислоты. С увеличением концентрации этих диэлектриков происходит снижение электропроводимости χ . Аппроксимацией экспериментальных данных были получены уравнения удельной электропроводимости электролита χ в зависимости от концентрации глицерина (табл. 1, 2).

Таблица 1

Электропроводимость χ различных типов электролитов

Состав электролитов	Удельная электропроводимость электролита в зависимости от концентрации глицерина, Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	Радиальный межэлектродный зазор h , мкм
1	$\chi = 0,1830204 - 4,346347 \cdot 10^{-3} \cdot C_{\text{ГЛ}} + 2,578661 \cdot 10^{-5} \cdot C_{\text{ГЛ}}^2$	3 ... 30
2	$\chi = 0,1115 - 1,6792 \cdot 10^{-3} \cdot C_{\text{ГЛ}} + 0,79515 \cdot 10^{-5} \cdot C_{\text{ГЛ}}^2$	3 ... 30
3	$\chi = 0,1331486 - 3,009244 \cdot 10^{-3} \cdot C_{\text{ГЛ}} + 1,685120 \cdot 10^{-5} \cdot C_{\text{ГЛ}}^2$	3 ... 30
4	$\chi = 0,1331486 - 3,009244 \cdot 10^{-3} \cdot C_{\text{ГЛ}} + 1,685120 \cdot 10^{-5} \cdot C_{\text{ГЛ}}^2$ электропроводимость олеиновой кислоты $\chi - 2 \cdot 10^{-10}$	1 ... 30

Таблица 2

Электропроводимость χ в зависимости от процентного содержания глицерина

Электролиты	Процентное содержание глицерина, %						
	72	76	80	84	88	100	
1	$0,47 \cdot 10^{-3}$	$0,40 \cdot 10^{-3}$	$0,34 \cdot 10^{-3}$	$0,32 \cdot 10^{-3}$	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-8}$	
2	$0,38 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$	$0,24 \cdot 10^{-3}$	$0,16 \cdot 10^{-3}$		
3	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,23 \cdot 10^{-3}$	$0,20 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$		
4	на механически активированных выступах	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,23 \cdot 10^{-3}$	$0,20 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-8}$
	во впадинах	$9,06 \cdot 10^{-7}$	$8,13 \cdot 10^{-7}$	$7,81 \cdot 10^{-7}$	$3,75 \cdot 10^{-7}$	$2,50 \cdot 10^{-7}$	

Для расчета скорости анодного растворения прирабатываемых поверхностей необходимо знать как изменяется выход по току от плотности тока для различных материалов прирабатываемых поверхностей (рис. 3).

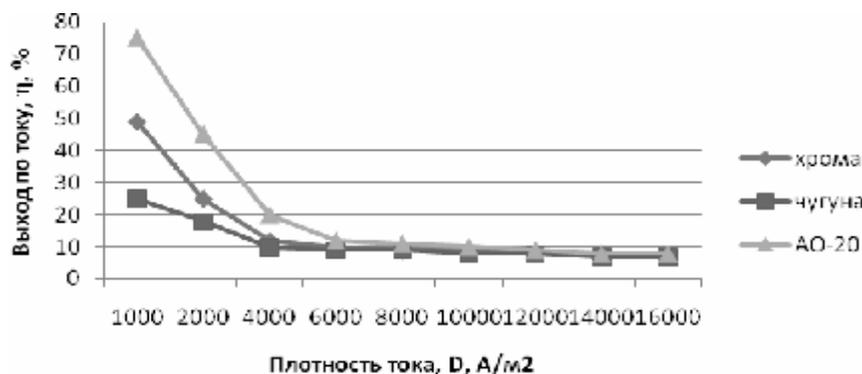


Рис. 4 – Изменение выхода по току η_a при ЭХМП(Д) поверхностей из различных материалов

Скорость анодного травления зависит от электрохимического эквивалента материала ϵ , его плотности ρ и других параметров, представленных в табл. 3

Таблица 3

Данные для расчета скорости электрохимического растворения металлов прирабатываемых деталей [9]

Металл	Плотность материала ρ , г/см ³	Электрохимический эквивалент материала ϵ , г/А·ч	Уравнение реакции	Электродный потенциал
Алюминий	2,699	0,839	$Al = Al^{3+} + 3e^-$	- 1,663
Водород	0,031	0,001	$2H = H_2 + 2e^-$	- 2,251
Железо	7,874	1,157	$Fe = Fe^{2+} + 2e^-$	- 0,440
Хром	7,19	1,077	$Cr = Cr^{3+} + 3e^-$	- 0,744
Медь	8,94	1,317	$Cu = Cu^{2+} + 2e^-$	0,337

Практическая реализация математической модели, описывающая уменьшение макрогеометрической погрешности при ЭХМП(Д) плоских поверхностей

Имея данные по применяемым электролитам и их характеристикам рассчитаем скорость устранения макрогеометрической погрешности V_{max} при ЭХМП(Д) сопряжения по схеме рис. 2. Расчет проведем для материала прирабатываемой детали – железа.

Из табл. 3 берем плотность материала детали – $\rho = 7,874$ г/см³ и электрохимический эквивалент $\epsilon = 1,157$ г/А·ч. Лучшим является электролит с пассивирующими свойствами. Добавление олеиновой кислоты усиливает эффект выравнивания прирабатываемой поверхности. Опытным путем было определено оптимальное процентное содержание глицерина. Оно составило 84 %. Поэтому расчет проведем для 4 электролита (смеси глицерина с 20 % водным раствором Na_2CO_3 в соотношении 84 % глицерина и 16 % раствора карбоната натрия и добавлением 4 % олеиновой кислоты). Электропроводимость выбранного электролита равна $\chi = 0,12 \cdot 10^{-3}$ Ом⁻¹·см⁻¹ без учета олеиновой кислоты на механически активированных выступах и $\chi = 3,75 \cdot 10^{-7}$ Ом⁻¹·см⁻¹ во впадинах (в зоне макрогеометрического отклонения). Геометрические параметры прирабатываемой детали принимаем следующие – $\delta_{max} = 50$ мкм (0,005 см), $ax + b = 10$ мкм, а выходы по току 10 и 30 % для анодного растворения без механической активации и с ней, соответственно ($\eta_a = 0,1$, $\eta_{ad} = 0,3$).

Минимальная толщина слоя электролита h_{min} зависит от параметров процесса приработки и может быть задана такими параметрами как скорость взаимного перемещения, давление в паре трения и вязкость электролита. В нашем случае примем $h_{min} = 3$ мкм (0,0003см). Множитель напряжения процесса $U - \phi_a + \phi_k = 4$ В, а время опыта ограничим $t = 10$ мин. Скорость механического съема будет мини-

мальной, с учетом малых нагрузок в паре трения ($V_m = 10^{-3}$ см/ч), а k_1 зададим равным 0,1. Подставляя обоснованные данные в уравнение математической модели (8), получим:

$$\begin{aligned}
 V_{\max} &= V_m + 1/2 \cdot (1 - k_1) \cdot \frac{\chi \varepsilon}{\rho} (\eta_{ad} (U - \varphi_{ad} + \varphi_k) / \sqrt{h_{\min}^2 + (1 - k_1) \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_{ad} (U - \varphi_{ad} + \varphi_k) \cdot t} - \\
 &- \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) / \sqrt{(h_{\min} + \delta_{\max} - ax - c)^2 + (1 - k_1) \frac{\chi \varepsilon}{\rho} \cdot \eta_a (U - \varphi_a + \varphi_k) \cdot t}) = \\
 &= 10^{-3} + 1/2 \cdot 0,9 \cdot \frac{0,12 \cdot 10^{-3} \cdot 1,157}{7,874} (0,3 \cdot 4 / \sqrt{0,0003^2 + 0,9 \cdot \frac{0,12 \cdot 10^{-3} \cdot 1,157}{7,874} \cdot 0,3 \cdot 4 \cdot 0,17} - \\
 &- 0,1 \cdot 4 / \sqrt{0,0043^2 + 0,9 \cdot \frac{3,75 \cdot 10^{-7} \cdot 1,157}{7,874} \cdot 0,1 \cdot 4 \cdot 0,17} = 0,001 + 0,01 = 0,011 \text{ (см/ч)}.
 \end{aligned}$$

Результат расчетов показал, что применение ЭХМП(Д) позволяет производить выравнивание макрогеометрических погрешностей металлических деталей. Электрохимическая составляющая процесса является наиболее значимой. Расчетные значения скорости механического съема V_m и других не табличных параметров процесса, входящих в уравнение, взяты с учетом экспериментального опыта автора и сотрудников. ЭХМП(Д) – это высокоэффективный способ приработки сопряженных поверхностей, но получение оптимальных результатов возможно при глубоком понимании процесса, описанного выражением (8).

Выводы

1. На основе выявленного механизма ЭХМП(Д), построена математическая модель взаимосвязи его параметров.
2. Выявлено, что процесс ЭХМП(Д) можно контролировать электрохимическими и механическими факторами, влияющими на толщину минимального слоя электролита h_{\min} , его электропроводимость χ и пассивирующие свойства, формирующих $R_{эл}$ – сопротивление минимального слоя электролита; $R_{эл} \cdot h / h_{\min}$ – сопротивление слоя электролита в зоне макрогеометрического отклонения и $R_{пл}$ – сопротивление пассивационной пленки.
3. Установлено наличие пассивационной пленки ускоряет выравнивание поверхности, поэтому целесообразно при этом использовать электролит с пассивирующими свойствами.

Литература

1. 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.
2. Алексеев В.П. Электрохимико-механическая макроприработка деталей. – Луганск:Элтон-2. – 2011-204 с.
3. Замота Т.Н. Физико-химические основы процесса макроприработки плоских поверхностей трения // Проблеми трибології. – 2011. – № 2. – С. 26-30.
4. 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
5. 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.
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. Любимов В.В., Китаев Ю.В. Влияние анионного состава электролита на выравнивающие свойства электрохимической обработки с периодической абразивной депассивацией // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 5. – С. 13-17.
8. Мороз И.И. Основы повышения точности электрохимического формообразования. – Кишинев: Штиинца, 1977. – 293 с.
9. Справочник по электрохимии / Под ред. А.М.Сухотина. – Л.:Химия, 1.

Надійшла 17.10.2011