

С. М. Братан, д-р техн. наук, Ю. К. Новоселов, д-р техн. наук,
Н. А. Минаев, Севастополь, Украина

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ

The article is devoted development of mathematical model of process of the electrochemical polishing for to high exactness treatment of non-rigid details, workings at the variable sign loading, in the devices of fine mechanics. The results of researches are in-process presented as evaluated by the capacity of wares, treated this method of polishing.

Введение

Одной из основных задач машиностроения является повышение производительности технологических процессов на основе комплексной автоматизации, создания автоматизированных производств и программно-управляемого оборудования. Особенно актуальна эта задача при производстве прецизионных приборов точной механики, например таких, как акселерометры. Требование повышения производительности при обработке деталей таких приборов сочетается с требованием повышения качества обработки поверхностей. Одновременное достижение этих показателей может быть обеспечено только за счет применения новых прогрессивных методов обработки и оптимального управления технологическими операциями[1].

В качестве иллюстрации рассмотрим технические требования и возможность реализации этих направлений на примере обработки маятников акселерометров, представляющих собой конструкцию, выполненную в виде плоского тела сложной конфигурации с фасонными поверхностями, изготовленными по 5 -6 квалитетам, с шероховатостью поверхности $Ra=0,16 - 0,8$ мкм.

Пример такой конструкции приведен на рис. 1(а,б,в). Традиционно для обработки деталей данного класса использовались методы абразивно-алмазной обработки [2]. Обработка шлифованием маятников акселерометра ДА-9 сопровождается большим количеством доводочных операций, требует высокого индивидуального мастерства рабочего. При этом стабильность качества готовых деталей составляет 13 - 15% от общего количества обработанных изделий при трудоемкости операций 1-3 часа на одну деталь.

Анализ литературных данных [3,5] позволяет сделать заключение, что одним из основных направлений создания управляемого процесса обработки является комбинированное шлифование в пассивирующих средах. При этом совмещение процессов существенно повышает возможности управления операцией, так как увеличивается число управляющих воздействий и подбираемых входных переменных.

Данный способ формообразования обеспечивает высокую точность обработки (5 - 6 квалитет) и низкую шероховатость поверхности ($Ra=0,16$ мкм), лишен большинства недостатков, присущих остальным методам финишной обработки, и является наиболее эффективным для формообразования прецизионных поверхностей.

Однако дальнейшее расширение сфер использования метода сдерживается отсутствием физических адекватных математических моделей данного процесса.

Поэтому целью данной работы является разработка математических моделей съема припуска на операциях комбинированного шлифования в пассивирующих средах.

Сложность выработки стратегии рационального управления заключается в сложности самих физических процессов образования поверхностей, связанных с большим числом технологических факторов, с помощью которых можно изменять параметры этого процесса.

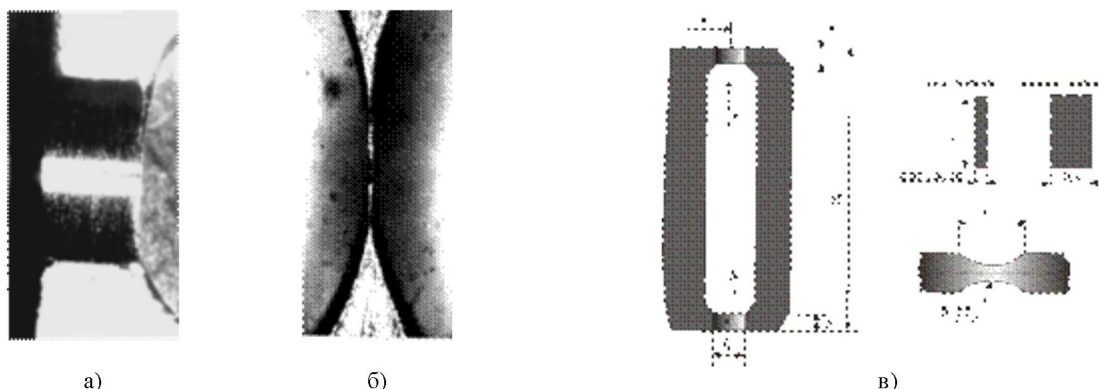


Рис. 1. Пример обрабатываемых поверхностей.

Основное содержание работы

Для получения математической модели, позволяющей рассчитывать съем материала при анодно-механическом шлифовании, рассмотрим процесс взаимодействия абразивного инструмента с заготовкой на микроуровне при взаимодействии электрического поля на обрабатываемую поверхность с образованием на ней пассивирующих пленок. При анализе учитываем шероховатость поверхности, сформированной на предыдущих рабочих проходах.

При комбинированном шлифовании съем материала может протекать за счет анодного растворения обрабатываемого металла $Q_{эл}$, микрорезания поверхности заготовки зернами инструмента $Q_{мех}$, удаление металла

электрической эрозией $Q_{ЭР}$, комбинации этих процессов.

$$Q_{\Sigma} = Q_{ЭХ} + Q_{МЕХ} + Q_{ЭР}$$

Известно, что процесс анодного растворения металлов при анодно-механическом шлифовании носит дискретный характер в каждой локальной области поверхности анода. Вследствие этого использования импульсного напряжения не улучшает показатели обработки по сравнению с использованием технологического напряжения [3]. Таким образом, при дальнейшем анализе процесса будем рассматривать воздействие постоянного тока на поверхности заготовки.

Допустим, что реальный процесс анодно-механического шлифования протекает при условиях, когда:

1. Отсутствуют электрические дуговые разряды между электродами и, соответственно, электроэрозионная компонента съема $Q_{ЭР}$.

2. Обмен электролита в реакционной зоне достаточно обильный и процесс анодного растворения не лимитируется актом отвода продуктов реакции от поверхности анода.

Учитывая конструктивные особенности объекта исследования, остановимся на схеме врезного шлифования. Особенность этой системы заключается в том, что обрабатываемая поверхность может контактировать с кругом непрерывно. Известно, что при воздействии электрического поля в пассивирующих средах, таких как жидкое стекло, водные растворы солей NaNO_3 , Na_2SO_4 и т. д., на поверхности заготовки (анода) происходит образование нерастворимых, высокоомных пассивирующих пленок у значительной группы металлов и сплавов, например, у сталей, бериллиевых бронз, латуней, титана и др., что приводит к снижению (торможению) скорости анодного растворения металла от максимального значения до нуля. С наступлением полной пассивации при как называемом потенциале Фладе анодное растворение металла полностью прекращается [3].

Скорость анодного растворения металла в пассивирующих средах экспоненциально зависит от времени обработки (см. рис. 2) и определяется выражением:

$$Q(t) = c \cdot e^{-\alpha(t-\tau)}, \quad (1)$$

где c - мгновенная линейная скорость анодного растворения металла, t - данный момент времени, τ - время активации поверхности заготовки, α - коэффициент пассивации.

Помножив выражение (1) на S_n и Δt , получим съем, вызванный анодным растворением металла на элементарной площадке:

$$\Delta Q_{(t)} = Q(t) \cdot S_n = S_n \cdot c \cdot \Delta t \cdot \exp[-\alpha(t-\tau)],$$

где S_n - площадь элементарной площадки.

В свою очередь, локальная линейная скорость анодного растворенного металла может быть вычислена по зависимости [3]

$$c = \varepsilon_{\Sigma} \times i \times \eta,$$

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{100}{\sum \frac{c_j}{\varepsilon_j}}$$

где ε_j - линейный электрохимический эквивалент сплава, c_j - процентное содержание отдельного компонента в сплаве, ε_j - электрохимический эквивалент компонента, i - плотность тока, η - выход по току.

При анодно-механическом шлифовании пассивация сопровождается абразивным воздействием инструмента. В результате срезания элементарной площадки ΔN абразивным зерном происходит локальная активация анодной поверхности, то есть после прохождения абразивного зерна на элементарной площадке анода возникает активная зона, в результате чего происходит уменьшение поляризации и перераспределение падения напряжения между при анодной областью и слоем электролита. Сдвиг потенциала в отрицательную сторону активизирует процесс растворения металла, однако затрудняет протекание на аноде других процессов, требующих больших значений поляризации.

Это выражается в локальном увеличении выхода по току η .

Время активного растворения составляет величину порядка нескольких мкс. и зависит от состава электролита и материала обрабатываемой детали.

Плотность тока в активной зоне (где срезана площадка) возрастает, в пассивной (где площадка не удалена) падает в результате перераспределения эквипотенциальных и силовых линий электрического поля (см. рис. 3), происходящего из-за различия при анодных потенциалов в зонах. При этом уменьшаются различные побочные реакции в пассивной зоне.

Поэтому даже при применении пассивирующих электролитов суммарный выход по току близок к единице.

По этой же причине с ростом напряжения на электродах увеличивается выход по току [3].

Данные закономерности подтверждаются экспериментально при обработке бериллиевых бронз (см. рис. 4).

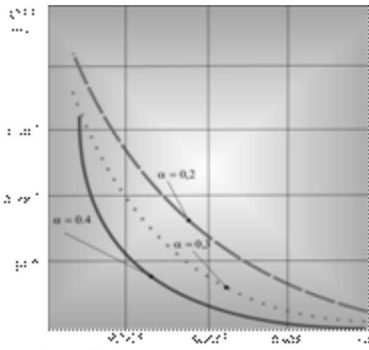


Рис. 2. Зависимость скорости анодного растворения от времени обработки в пассивирующих средах

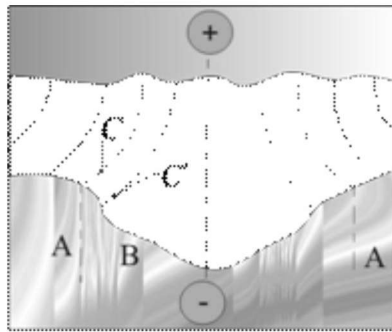


Рис. 3. Распределение силовых линий A – активная зона анодного растворения; B – пассивная зона анодного растворения; C – силовые линии в активной зоне; C' – силовые линии в пассивной зоне

Считая, что $\eta \rightarrow 1$ выражение для расчета мгновенной линейной скорости анодного растворения металла запишется $c = \varepsilon_2^j$. Допустим, что реальный процесс согласуется с законом Ома, тогда ток в цепи электролита вычисляется по известной зависимости:

$$I = \frac{z \times u}{\delta} = \frac{u}{R_1}$$

где u – падение напряжения в цепи, R_1 – сопротивление межэлектродного зазора, δ – межэлектродный зазор, z – электропроводность электролита.

В исследованиях [3], по $x = \frac{R \cdot T_2 \cdot z_1 \cdot D}{2 F_\phi \cdot V \cdot \rho_2^2}$ получено выражение для определения электропроводности с учетом газовыделения:

$$z = z_1 \exp - \frac{R \cdot T_2 \cdot z_1 \cdot D}{2 F_\phi \cdot V \cdot \rho_2^2}$$

где R – универсальная газовая постоянная, T_2 – температура электролита, D – коэффициент, учитывающий давление водорода в газовых пузырьках, F_ϕ – константа Фарадея, ρ_2 – плотность газа, z_1 – удельная электропроводность электролита.

На основании вышеизложенного выражение для расчета съема металла, вызванного анодным растворением на элементарной площадке, запишется:

$$\Delta Q(\tau') = \frac{\varepsilon_2 \cdot u \cdot z_1 \cdot S_n \cdot \Delta t}{\delta} \exp[-x - \alpha(t - \tau)]$$

где $\Delta Q(\tau')$ – скорость растворения металла на элементарной площадке.

При прохождении абразивных зерен через уровень на обрабатываемой поверхности образуются элементарные площадки. если известно число площадок DN , возникающих в любой момент времени, то можно вычислить

$$\Delta Q_{\Sigma} = [\Delta Q(\tau') \cdot S_n \cdot \Delta N(\tau)] \cdot \Delta t \quad (2)$$

где ΔN – число площадок, Δt – приращение времени.

Единственной неизвестной величиной в уравнении (2) является ΔN – число площадок, возникающих в любой момент времени.

Для получения зависимости, позволяющей рассчитывать количество площадок, возникающих в любой заданный момент времени t , рассмотрим рис.5.

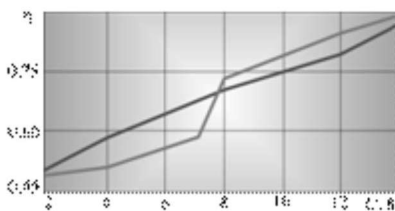


Рис. 4. Зависимость выхода по току от напряжения на электродах U для деталей из бериллиевой бронзы и стали 30XН2МФА (без учета абразивного воздействия)

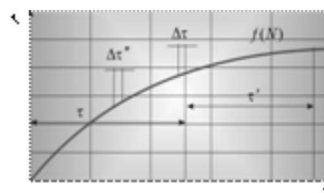


Рис. 5. Схема к расчету электрохимического съема металла с учетом обновления поверхности в результате абразивного воздействия.

Пусть в момент времени t_1 через рассматриваемый уровень заготовки начинают проходить вершины наиболее выступающих абразивных зерен.

В случае контактирования абразивных зерен с металлом на его поверхности появляются элементарные площадки. Однако вследствие наложения единичных срезов друг на друга у значительной части зерен контакт с материалом будет неполным. Он распространится не на всю ширину абразивного зерна. Другая часть абразивных зерен вообще попадает в единичные риски. В этом случае площадки не образуются.

Число зерен, контактирующих с материалом, пропорционально вероятности его не удаления, то есть на основе анализа вероятности контакта вершин зерен с материалом может быть вычислено количество площадок, образовавшихся в момент времени t . Вероятность появления площадки равна вероятности события, заключающегося в том, что точка профиля зерна пройдет через металл. Если, например, за время Δt через уровень Δu , расположенный в пределах $u = 0$ до $u = t_{\phi}$ пройдет $\Delta \lambda$ зерен, то число появляющихся площадок будет равно:

$$P_N = \Delta \lambda \cdot P(\bar{M}),$$

где $P(\bar{M})$ - вероятность не удаления материала в момент времени t на уровне W

Однако часть площадок, образовавшихся в момент времени t , попадает с учетом перекрытия в зону действия одного из зерен и может быть срезана в любой момент времени

$$\tau' = t - \tau,$$

где t - данный момент времени, τ' - время существования площадки.

Очевидно, для того чтобы определить число площадок в любой момент времени t , нужно домножить вероятность появления площадки P_N на вероятность события, заключающегося в том, что площадка, образовавшаяся за время $\Delta \tau$ на уровне W , не будет срезана.

$$\Delta N(\tau') = \Delta \lambda \cdot P(\bar{M}) \cdot P_N(\bar{M}), \quad (3)$$

где $P_N(\bar{M})$ - вероятность того, что площадка, образовавшаяся за время $\Delta \tau$ на уровне W , не будет срезана.

Число зерен, прошедших через сечение W за период $\Delta \tau$, вычисляется по плотности распределения

$$\Delta \lambda_{\Sigma} = V_k \cdot n_3 \cdot f(u) \cdot \Delta u \cdot \Delta \tau,$$

где n_3 - количество зерен в единице объема рабочего слоя инструмента, u - расстояние от условной наружной поверхности инструмента до вершины зерна, V_k - окружная скорость инструмента.

Аппроксимируя функцию распределения количества рабочих зерен инструмента $f(u)$ степенной зависимостью

вида $\frac{\lambda}{H_u^{\lambda}} u^{\lambda-1}$, получим:

$$\Delta \lambda = \left[V_k \cdot n_3 \int_0^W \frac{\lambda}{H_u^{\lambda}} u^{\lambda-1} du \right] \Delta \tau, \quad (4)$$

где H_u - величина слоя рабочей поверхности круга по глубине, в пределах которой подсчитывается число абразивных зерен n_3 , λ - показатель степени.

После интегрирования по u зависимость (4) примет вид:

$$\Delta \lambda = \frac{V_k \cdot n_3 \cdot W^{\lambda}}{H_u^{\lambda}} \cdot \Delta \tau. \quad (5)$$

Вероятность не удаления материала в момент времени τ на уровне W определяется зависимостью:

$$P(\bar{M}) = \exp[-a(y; \tau)], \quad (6)$$

где $a(y; \tau)$ - сумма поперечных сечений зерен на уровне W за время от t_1 до τ определяется выражением:

$$a(y; \tau) = k_c \cdot b_3(y) \cdot \lambda,$$

где k_c - коэффициент стружкообразования, λ - число зерен, прошедших через единичное сечение,

$$b_3(y) = \frac{\bar{b}_{31} + \bar{b}_{32} + \dots + \bar{b}_{3n}}{n}$$

- ширина профилей абразивных зерен.

При аппроксимации профиля зерна степенной зависимостью (в простейшем случае параболоидом вращения)

$$\bar{b}_3(y) = c_b \left[t_{\phi} - y - u \right]^m,$$

где c_b , m - коэффициенты формы зерна, y - расстояние от наружной поверхности заготовки до рассматриваемого уровня.

За время $\Delta \tau'$ через поверхность заготовки проходит участок с длиной дуги $V_k \cdot \Delta \tau'$.

Из общего числа зерен, прошедших через сечение, ширину профиля $\bar{b}_3(y)$ будут иметь зерна, вершины которых

расположены в слое круга $1 \cdot \Delta u \cdot V_k \cdot \Delta \tau''$. Число таких вершин вычисляется по плотности распределения $f(u)$.

$$\Delta \lambda = n_3 \cdot V_k \cdot f(u) \cdot \Delta u \cdot \Delta \tau''$$

После выполнения соответствующих подстановок получим выражение для расчета $\Delta a(y; \tau)$:

$$\Delta a(y; \tau) = k_c \cdot n_3 \cdot V_k \cdot C_b [t_\phi - y - u]^m \cdot f(u) \cdot \Delta u \cdot \Delta \tau''$$

При установившемся процессе анодно-механического шлифования размер детали изменяется непрерывно и пропорционально времени обработки. Для участка поверхности, расположенной на расстоянии y от базовой плоскости, материал начинает удаляться в момент времени t_ϕ , когда вершины наиболее выступающих зерен начинают проходить через рассматриваемый уровень. Материал полностью удалится после выхода зерна из зоны контакта.

Переходя от дискретной модели к непрерывной, получим интегральное уравнение, определяющее изменение параметра вероятности в зоне контакта детали с кругом в момент времени τ на уровне W :

$$a(y; \tau) = n_3 \cdot V_k \cdot k_c \int_0^\tau \int_0^{S_y \cdot \tau''} b_3 \cdot f(u) \cdot du \cdot d\tau''$$

Аппроксимируя функцию распределения $f(u)$ степенной зависимостью, после интегрирования по u и τ получим:

$$a(y; \tau) = \frac{x \cdot k_c \cdot C_b \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(x) \cdot n_3 \cdot V_k \cdot [S_y (\tau - t_0)]^{x+m+1}}{H_u^x \cdot (m+x+1) \cdot \Gamma(x+m+1) \cdot S_y}$$

где $\Gamma(m+1); \Gamma(x); \Gamma(x+m+1)$ - значения Г-функций; S_y - скорость движения рабочей поверхности инструмента в материале заготовки в направлении подачи.

Обозначим:

$$A = \frac{x \cdot k_c \cdot C_b \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(x) \cdot n_3 \cdot V_k}{H_u^x \cdot (x+m+1) \cdot \Gamma(x+m+1)}, \quad Q = AS_y^{x+m}$$

Учитывая, что t_0 - момент прохождения через уровень первого зерна, формула для расчета $a(y; \tau)$ примет вид:

$$a(y; \tau) = A \cdot S_y^{x+m} \cdot \tau^{x+m+1} \quad (7)$$

Подставив (7) в (6), получим выражение для расчета вероятности неудаления материала в момент времени t на уровне W .

$$P(\bar{M}) = \exp[-Q \tau^{x+m+1}] \quad (8)$$

Вероятность $P_M(\bar{M})$ того, что площадка, образовавшаяся на уровне W за время $\Delta \tau$, не будет срезана за время τ' , можно вычислить:

$$P_M(\bar{M}) = \exp[-a(\tau')] = \exp[-a(t) - a(\tau)] \quad (9)$$

Выполнив аналогичные преобразования, получим интегральное уравнение, определяющее изменение суммы поперечных сечений зерен на уровне W за время τ' ,

$$a(t) = \int_0^t \int_0^{S_y \tau''} b_3 \cdot f(u) \cdot d\tau'' \quad a(\tau) = \int_0^\tau \int_0^{S_y \tau''} b_3 \cdot f(u) \cdot d\tau'' \quad (10)$$

Используя для аппроксимации профилей абразивных зерен и функции распределения степенные зависимости, после интегрирования (10) получим:

$$a(t) = \frac{x \cdot k_c \cdot C_b \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(x) \cdot n_3 \cdot V_k \cdot [S_y \cdot t]^{x+m+1}}{H_u^x \cdot (x+m+1) \cdot \Gamma(x+m+1) \cdot S_y}, \quad a(\tau) = \frac{x \cdot k_c \cdot C_b \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(x) \cdot n_3 \cdot V_k \cdot [S_y \cdot \tau]^{x+m+1}}{H_u^x \cdot (x+m+1) \cdot \Gamma(x+m+1) \cdot S_y}$$

Обозначив через

$$Q = \frac{x \cdot k_c \cdot C_b \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(x) \cdot n_3 \cdot V_k \cdot S_y^{x+m+1}}{H_u^x \cdot (x+m+1) \cdot \Gamma(x+m+1) \cdot S_y},$$

получим уравнение для расчета показателя $a(\tau')$:

$$a(\tau') = a(t) - a(\tau) = Q \cdot t^{x+m+1} - Q \cdot \tau^{x+m+1} \quad (11)$$

После подстановки (11) в (9) выражение для расчета вероятности не срезания за время τ' площадки, образовавшейся за период $\Delta \tau$ на уровне W , примет вид:

$$P_M(\bar{M}) = \exp[-Q \cdot (t^{x+m+1} - \tau^{x+m+1})] \quad (12)$$

Подставив (5), (8), (12) в (3), примем:

$$\Delta N(\tau') = \frac{V_k \cdot n_1 \cdot (S_y \cdot \tau)^x}{H_n^x} \Delta \tau \cdot \exp[-\Theta \cdot \tau^{x+m+1}] \cdot \exp[-\Theta \cdot (\tau^{x+m+1} - \tau'^{x+m+1})]$$

$$\frac{V_k n_1 S_y^x}{H_n^x} = G, \quad x+m+1 = K$$

Тогда уравнение для расчета $\Delta N(\tau')$, с учетом обозначений, приведенных выше, запишется:

$$\Delta N(\tau') = G \cdot \tau^x \Delta \tau \cdot \exp(-\Theta \cdot \tau^K) \quad (13)$$

После подстановки (1) и (13) в (2) зависимость для расчета приращения электрохимического съема металла с учетом обновления поверхности за счет абразивного воздействия запишется:

$$\Delta Q_{zx} = S_n \cdot \Delta t \cdot c \cdot \exp(-\alpha(t-\tau)) \cdot G \cdot \tau^x \Delta \tau \cdot \exp(-\Theta \cdot \tau^K)$$

Обозначим $S_n \cdot \Delta t \cdot c \cdot G = L$, тогда

$$\Delta Q_{zx} = L \cdot \tau^x \cdot \exp(-\alpha(t-\tau)) \cdot \exp(-\Theta \cdot \tau^K) \cdot \Delta \tau = L \cdot \tau^x \cdot \exp(-\alpha t + \alpha \tau - \Theta \cdot \tau^K) \cdot \Delta \tau \quad (14)$$

После интегрирования по τ выражения (14) получим интегральное уравнение, описывающее электрохимический съем металла с учетом обновления поверхности за счет абразивного воздействия.

$$Q_{zx} = L \cdot \int_0^t \tau^x \exp(\alpha \tau - \alpha t - \Theta \tau^K) \cdot d\tau \quad (15)$$

Дальнейшее интегрирование возможно только при известных значениях показателей x и K .

При $x=1.5, K=3$ выражение (15) примет вид:

$$Q_{zx} = L \int_0^t \tau^{1.5} e^{-\alpha t + \alpha \tau - \Theta \tau^3} d\tau, \quad Q_{zx} = L \int_0^t \tau^{1.5} \exp(\alpha \tau - \alpha t - \Theta \tau^3) \cdot d\tau \quad (16)$$

Уравнение (16) позволяет рассчитывать электрохимический съем материала с учетом обновления поверхности заготовки за счет абразивного воздействия в любой точке зоны контакта детали с кругом и проследить закономерности срезания площадок единичными абразивными зёрнами.

Пример:

Рассчитать Q_{zx} при шлифовании деталей из меди.

Режим шлифования:

Окружная скорость инструмента $V_k = 5 \text{ м/с}$; скорость движения инструмента в направлении подачи $S_y = 10^{-1} \text{ м/с}$; плотность тока $i = 10 \text{ А/см}^2$, $K_C = 0.9$, $\rho_n = 21 \times 10^{-1} \text{ м}$, $n_1 = 5,2 \times 10^1 \text{ 1/м}^2$ для кругов зернистостью 250 мкм., электрохимический эквивалент меди $\epsilon_k = 0,021 \text{ мм/А} \cdot \text{мин}$. Расчет выполним при $H_n = 10,87 \times 10^{-1} \text{ м}$, $\Delta \tau = 1 \text{ с}$, $a = 0,8$, $t = 1 \text{ с}$.

Вычислим интеграл численным интегрированием, интервал поиска [0;3].

Данные расчета (см. рис. 6) показывают, что при прохождении поверхности зоны контакта круга с деталью скорость съема металла увеличивается в пределах фактической глубины резания до некоторого уровня; достигает максимума, а затем уменьшается по мере приближения к уровню, соответствующему t_ϕ ; приближается к нулю. На основании данного расчета можно предположить, что при первом касании заготовки с кругом (в момент времени t_0) материал начинает удаляться. При этом число режущих кромок, вступающих в работу, будет больше числа образовавшихся площадок.

Вследствие этого число образовавшихся площадок первоначально будет увеличиваться. После некоторого числа касаний круга с деталью число режущих кромок круга, вступающих в работу, будет уравниваться числом образованных элементарных площадок, а затем становиться меньше.

Таким образом, число образующихся элементарных площадок на поверхности заготовки будет достигать максимума, а затем уменьшаться и на глубине $\geq t_\phi$ число этих площадок будет стремиться к нулю.

На электрохимический съем металла, с учетом обновления поверхности в результате абразивного воздействия, оказывают влияние все режимы шлифования. С их изменением изменяется наклон возрастающей и ниспадающей ветвей кривой, протяженность и положение максимума (см. рис. 7). При увеличении скорости круга, степени пассивации заготовки, снижении максимальной глубины резания уменьшается протяженность кривых, максимум кривых смещается в сторону меньших значений W .

При $\alpha = 0$, то есть когда отсутствует пассивация, электрохимический съем металла Q_{zx} принимает максимальное значение для заданных режимов шлифования.

$$Q_{zx} = L \int_0^t \tau^{1.5} e^{-\Theta \tau^3} d\tau$$

Полученные данные показывают, что на процесс съема металла существенное влияние оказывает пассивация, имеющая место при анодно-механическом шлифовании. С повышением (пассивирующей способности электролита) пассивации уменьшается скорость электрохимического съема, повышается точность обработки. При отсутствии пассивации приводит к растравливанию поверхности заготовки по границам зерен. Для упрощения вычислений

параметра $Q_{\text{м}}$ введем показатель K_M , учитывающий влияние пассивации на электрохимический сьем металла с учетом обновления поверхности за счет абразивного воздействия.

$$K_M = \int_0^t \tau^{1-\alpha} \exp(-\alpha \cdot t + \alpha \cdot \tau - \Theta \cdot t^3) d\tau / \int_0^t \tau^{1-\alpha} \exp(-\Theta \cdot t^3) d\tau$$

Тогда выражение, описывающее скорость электрохимического съема материала с учетом обновления поверхности абразивным воздействием, примет вид:

$$Q_{\text{ЭХ}} = \frac{E_{\text{Э}} \cdot i \cdot \eta \cdot K_M}{6 \cdot 10^{-3}} = B \cdot K_M \quad (17)$$

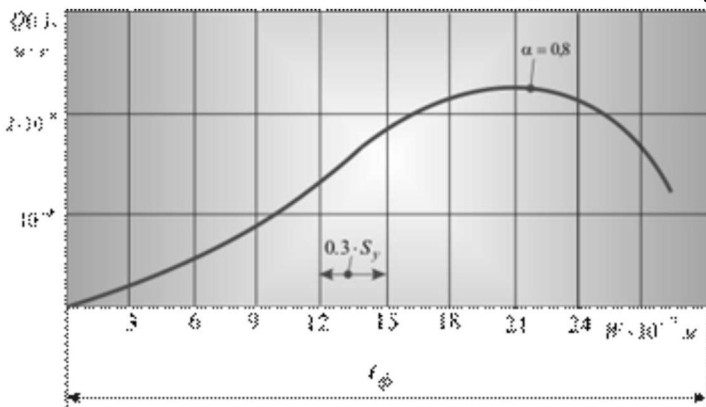


Рис. 6. Зависимость скорости съема металла $Q_{\text{ЭХ}}$ на уровнях зоны контакта в пределах фактической глубины резания

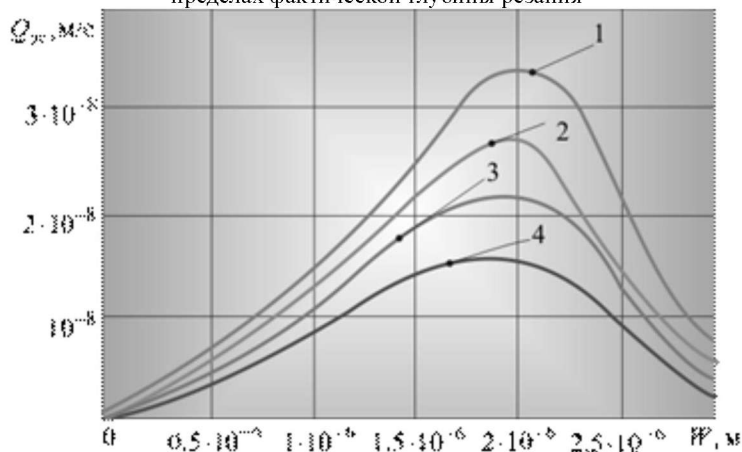


Рис. 7. Зависимость скорости съема металла $Q_{\text{ЭХ}}$ от параметров режима.

1- $\alpha = 0.1$, $V_{\text{м}} = 1 \text{ м/с}$; 2- $\alpha = 0.4$, $V_{\text{м}} = 1 \text{ м/с}$; 3- $\alpha = 0.8$, $V_{\text{м}} = 0.8 \text{ м/с}$; 4- $\alpha = 1.2$, $V_{\text{м}} = 0.5 \text{ м/с}$

Вычисление скорости съема материала за счет механического резания возможно на основании определения смещения уровня равной вероятности удаления металла до и после контакта участка поверхности заготовки с инструментом [4].

Для случая врезного шлифования зависимость имеет вид:

$$P(M) = 1 - \exp \left[\frac{\pi \cdot k_c \cdot \sqrt{2} \cdot R_2 \cdot n_1 \cdot V_k \cdot S_{\text{Ф}}^2 \cdot t^3}{8 \cdot H_{\text{м}}^{1.5}} \right], \quad (18)$$

где R_2 – радиус округления вершины зерна.

То есть скорость съема материала за счет механического резания численно равна скорости движения рабочей поверхности инструмента в материале заготовки в направлении подачи. После несложных преобразований зависимости (18) получим выражение, позволяющее рассчитывать сьем материала за счет механического резания.

$$Q_{\text{мех}} = \frac{\pi \cdot k_c \cdot n_1 \cdot V_k \cdot t_{\text{Ф}}^1 \cdot \sqrt{2} \cdot R_2}{25,296 \cdot H_{\text{м}}^{1.5}} \quad (19)$$

$$A = \frac{\pi \cdot k_c \cdot n_1 \cdot V_k \cdot \sqrt{2} \cdot R_2}{25,296 \cdot H_{\text{м}}^{1.5}}$$

Обозначим

Суммируя выражения (17), (19) получим уравнение для расчета суммарной скорости съема материала при врезном анодно-механическом шлифовании:

$$Q_{\text{с}} = Bk_{\text{м}} + At_{\text{Ф}}^1 \quad (20)$$

Анализ уравнения (20) показывает, что в сравнении с обычной абразивной обработкой комбинированное шлифование позволяет увеличить производительность обработки на величину скорости электрохимического съема с учетом абразивного воздействия.

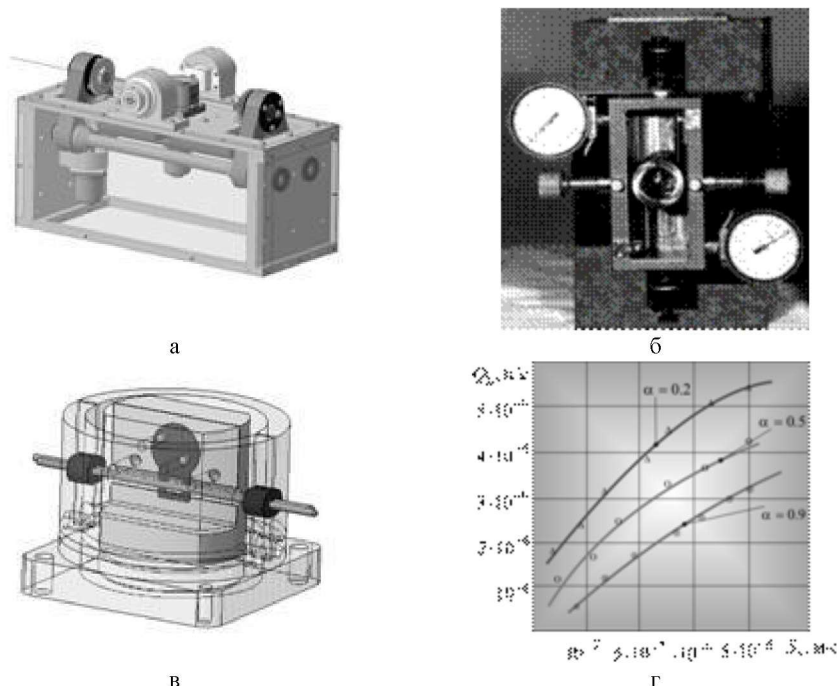


Рис. 8. Зависимость скорости съема материала $Q_{н}, м/с$ от степени пассивации среды α и подачи инструмента $S_{п}, м/с$ при $I = 5 А/см^2$, $V_{н} = 0.5 м/с$,
 $\Delta \circ \otimes$ – экспериментальные данные

Проверку адекватности полученных математических моделей реальному процессу производили сопоставлением расчетных и экспериментальных данных на специально разработанном оборудовании (см. рис. 8 а,б,в). Съем материала определяли с помощью микроскопа БИМ-5 как среднее значение разности диаметра и удвоенной глубины лунки h после обработки, измеренных в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Погрешность измерения составляет ± 0.0005 мм. Относительная погрешность расчетных и экспериментальных данных не превышает 15%, что указывает на достаточную степень адекватности разработанных моделей реальному процессу.

Для выявления работоспособности изделий после электрохимического шлифования их сравнивали с образцами, обработанными механическим шлифованием, - наиболее распространенным методом окончательной обработки деталей приборов. С этой целью была спроектирована и изготовлена специальная установка (низкочастотный релаксатор), общий вид которого приведен на рисунке 9.

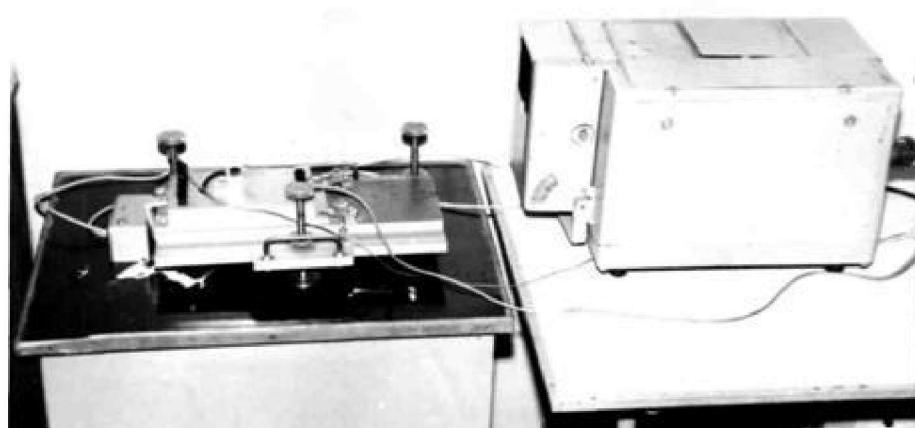


Рис. 9. Низкочастотный релаксатор

При сравнительных испытаниях были использованы маятники акселерометра ДА-9 из БрБ2 и стали 36ХНЮ-ВИ с одинаковой шероховатостью поверхности $Ra=0.16$.

Работоспособность деталей определяли через их долговечность. Долговечность рассматривали как результат действия случайных факторов, т. е. как случайную величину. За случайную величину принимали число циклов до

разрушения D.

Для проверки этого были испытаны по две партии образцов из бериллиевой бронзы БрБ2 и стали 36ХНЮ-ВИ, обработанные шлифованием на следующих режимах:

1- партия - $U = 3 \text{ в}$, $S_y = 5 \cdot 10^{-1} \text{ м/с}$, $V_k = 1,5 \text{ м/с}$, (согласно рентгенографическим исследованиям при данном режиме в поверхностном слое деталей формируются сжимающие остаточные напряжения) [5]; 2 - партия $U = 3 \text{ в}$, $S_y = 10^{-1} \text{ м/с}$, $V_k = 1,5 \text{ м/с}$ (когда в поверхностном слое деталей остаточные напряжения незначительны) [5]; 3- партия образцов была получена механическим шлифованием данных материалов: $U = 0 \text{ в}$, $S_y = 3 \cdot 10^{-1} \text{ м/с}$, $V_k = 1,5 \text{ м/с}$ [5].

Образцы подвергли циклической нагрузке до разрушения

По данным испытаний построили законы распределения образцов (рис. 10).

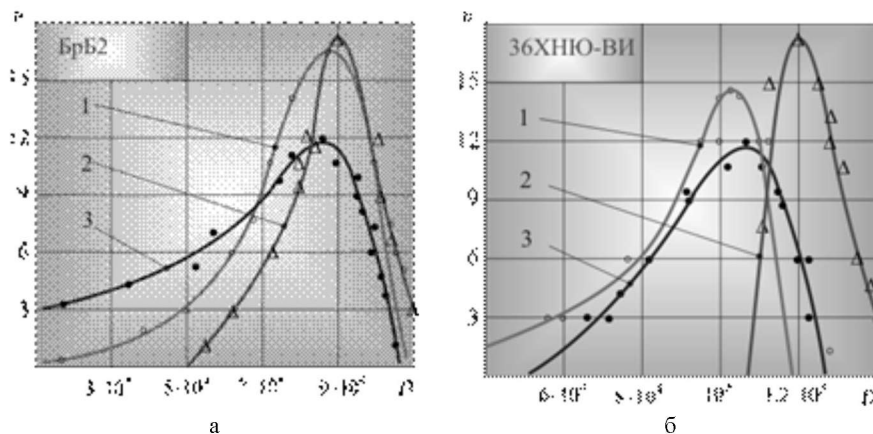


Рис. 10. Законы распределения образцов из БрБ2 (а), стали 36ХНЮФ-ВИ (б)

Анализ рисунка 10 показывает, что стабильность характеристики D для образцов, обработанных электрохимическим шлифованием, значительно выше стабильности характеристики D образцов, обработанных механическим шлифованием. Причем стабильность данной характеристики выше у изделий, не имеющих в поверхностном слое остаточных напряжений.

Таким образом, применение электрохимического шлифования при обработке деталей приборов способствует значительному повышению их долговечности.

Выводы

1. Проведенные качественные и количественные оценки свидетельствуют об адекватности математических моделей. Отклонения экспериментальных значений от расчетных составили 5 – 10%, что позволяет использовать данные модели для управления показателями процессов в широком диапазоне варьирования при шлифовании различных материалов.

2. Электрохимическое шлифование позволяет повысить работоспособность деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, в сравнении с механическим шлифованием. Причем значения гарантированной долговечности выше у изделий, имеющих в поверхностном слое сжимающие остаточные напряжения.

3. Исследование операций электрохимического шлифования показывает [5], что в начальный момент времени работы инструмента после правки при правильном подборе его характеристики, режимов обработки, оптимальном построении цикла шлифования, как правило, обеспечиваются заданные параметры точности и шероховатости поверхности детали.

В результате износа инструмента зерна на его поверхности затупляются, на вершинах появляются площадки, которые прогрессируют. Это оказывает влияние на качество обрабатываемой поверхности. Вышеуказанные явления необходимо учитывать при разработке математических моделей процесса. Сформулированная задача представляет собой перспективы дальнейших разработок в данном направлении.

Список литературы: 1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. - М.: Машиностроение, 1977.—390 с. 2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования/ А.В. Якимов. - М.: Машиностроение, 1975.—176с. 3. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания/ В.Н. Подураев. - М.: Машиностроение, 1977, 304 с. 4. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке/ Ю.К. Новоселов. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979. - 232 с 5. Братан С.М. Технологічні основи забезпечення якості і підвищення стабільності високопродуктивного чистового тонкого шліфування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування»/ С.М. Братан. - Одеса, 2006. - 35 с.

Поступила в редколлегию 15.03.09