

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СЪЁМА МАТЕРИАЛА НА ОПЕРАЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО ШЛИФОВАНИЯ В ПАССИВИРУЮЩИХ СРЕДАХ

Братан С.М., Новоселов Ю.К., Минаев Н.А.
(СевНТУ, г. Севастополь, Украина)

Введение

Решение сложной технико-экономической задачи по повышению эффективности обработки прецизионных деталей на финишных операциях может быть обеспечено за счет применения электрохимического шлифования, оптимально управляемого по съему припуска. Данный вид обработки отличается расширенными технологическими возможностями в сравнении с традиционными методами финишной обработки, [1].

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.

Основное содержание работы

Для получения математической модели, позволяющей рассчитывать съем материала при электрохимическом 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, микрорезания поверхности заготовки зернами инструмента и комбинации этих процессов.

В результате срезания стружки 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. 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, происходящего из-за различия прианодных потенциалов в зонах. При этом уменьшаются различные побочные реакции в пассивной зоне.

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

$$\Delta Q(\tau') = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot u \cdot z_0 \cdot S_n \cdot \Delta t}{\delta} \exp[-x - \alpha(t - \tau)], \quad (1)$$

где $\Delta Q(\tau')$ - скорость растворения металла на элементарной площадке,
 u - расстояние от условной наружной поверхности до вершины зерна,
 z_0 - удельная электропроводность электролита,
 Δt - приращение времени,
 α - степень пассивации электролита,
 t - данный момент времени,
 δ - зазор между деталью и инструментом,

$$x = \frac{R \cdot T_{\varepsilon} \cdot z_0 \cdot D}{2 \cdot F_{\phi} \cdot V \cdot \rho_z^2},$$

где R - универсальная газовая постоянная,
 T_{ε} - температура электролита,
 D - коэффициент, учитывающий давление водорода в газовых пузырьках,
 F_{ϕ} - константа Фарадея,
 ρ_z - плотность газа.

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

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

где ΔN - число площадок.

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

Пусть в момент времени t_0 через рассматриваемый уровень заготовки начинают проходить вершины наиболее выступающих абразивных зерен.

В случае контакта 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 τ . Вероятность появления площадки равна вероятности события, заключающегося в том, что точка профиля зерна пройдет через металл. Если, например, за время Δt че-

рез уровень Δu , расположенный в пределах от $u = 0$ 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 неудаления материала в момент времени τ .

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

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

τ' - время существования площадки.

Очевидно, для того чтобы определить число площадок в любой момент времени t , нужно умножить 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 $\Delta \tau$, не будет срезана.

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

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

где n_3 - количество зерен в единице объема рабочего слоя инструмента,

V_k - окружная скорость инструмента.

Аппроксимируя функцию распределения количества рабочих зерен инструмента $f(u)$ степенной зависимостью вида $\frac{\chi}{H_u^\chi} u^{\chi-1}$, получим

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

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

χ - показатель степени.

После интегрирования по u зависимость (4) примет вид

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

Вероятность неудаления 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 рассматриваемом уровне за время от t_0 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)

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

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_0 , когда вершины наиболее выступающих зерен начинают

проходить через рассматриваемый уровень. Материал полностью удаляется 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

$$a(y; \tau) = n_3 \cdot V_k \cdot k_c \int_{t_0}^{\tau} \int_0^{S_y \cdot \tau''} b_3 \cdot f(u) \cdot du \cdot d\tau''.$$

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

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

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 τ

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

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

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

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

$$a(t) = \int_{\tau}^t S_y \cdot \tau^m \int_0^{\tau} b_3 \cdot f(u) \cdot d\tau^m, \quad a(\tau) = \int_{t0}^{\tau} \int_0^{\tau} b_3 \cdot f(u) \cdot d\tau^m. \quad (10)$$

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

$$a(t) = \frac{x \cdot k_c \cdot C_b \cdot \Gamma(m+1) \cdot \Gamma(x) \cdot n_3 \cdot V_k \cdot [S_y \cdot \tau']^{x+m+1}}{H_u^x (x+m+1) \Gamma(x+m+1) S_y},$$

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

Обозначив через

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

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

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

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

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

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

$$\Delta N(\tau') = \frac{V_k \cdot n_3 \cdot (S_y \cdot \tau)^x}{H_u^x} \Delta \tau \cdot \exp[-\theta \cdot \tau^{x+m+1}] \cdot \exp[-\theta \cdot (t^{x+m+1} - \tau^{x+m+1})]$$

Обозначим: $\frac{V_k n_3 S_y^x}{H_u^x} = G, \quad x+m+1 = K.$

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:

$$\Delta Q_{\text{ЭХ}} = S_n \cdot \Delta t \cdot c \cdot \exp[-\alpha(t - \tau)] \cdot G \cdot \tau^x \Delta \tau \cdot \exp[-\theta \cdot t^K]$$

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

$$\Delta Q_{\text{ЭХ}} = L \cdot \tau^x \cdot \exp[-\alpha(t - \tau)] \cdot \exp[-\theta \cdot t^K] \cdot \Delta \tau = L \cdot \tau^x \cdot \exp[-\alpha t + \alpha \tau - \theta \cdot t^K] \cdot \Delta \tau \quad (14)$$

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

$$Q_{\text{ЭХ}} = L \cdot \int_0^t \tau^x \exp[\alpha \tau - \alpha t - \theta t^K] dt \quad (15)$$

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

Уравнение (15) позволяет рассчитывать электрохимический съём 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.

При прохождении поверхности зоны контакта круга с деталью скорость съёма металла увеличивается в пределах фактической глубины резания до некоторого уровня; достигает максимума, а затем уменьшается по мере приближения к уровню, соответствующему t_{ϕ} и приближается к нулю. На основании этого 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 съём 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 (рис. 1). 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 съём металла $Q_{\text{ЭХ}}$ принимает максимальное значение для заданных режимов шлифования:

$$Q_{\text{ЭХ}\alpha} = L \int_0^t \tau^x e^{-\theta \cdot t^K} dt$$

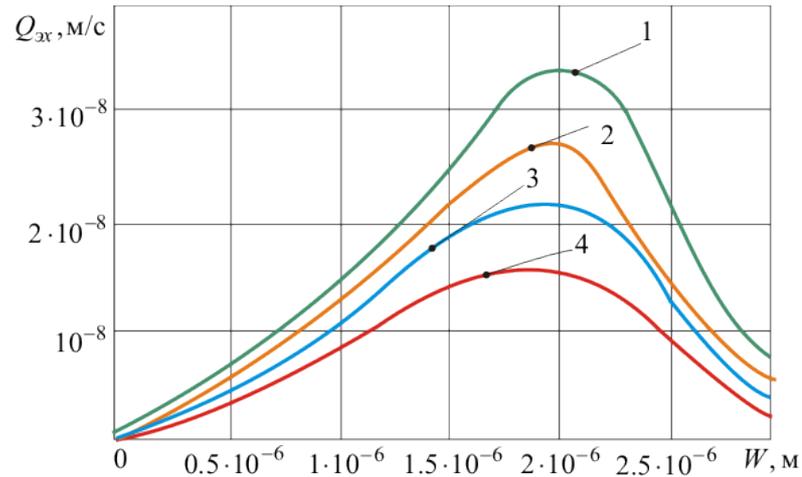


Рис. 1. Зависимость скорости съема металла $Q_{эx}$ от параметров режима:

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

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 съема металла приводит к растравливанию поверхности заготовки по границам зерен. Для упрощения вычислений параметра $Q_{эx}$ введем показатель K_N , учитывающий влияние пассивации на электрохимический съем металла с учетом обновления поверхности за счет абразивного воздействия

$$K_N = \frac{\int_0^t \tau^\lambda \exp[-\alpha t + \alpha \tau - \Theta \cdot t^K] dt}{\int_0^t \tau^\lambda \exp[-\Theta \cdot t^K] dt}.$$

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

$$Q_{эx} = \frac{\varepsilon \varepsilon \cdot i \cdot \eta \cdot K_N}{6 \cdot 10^{-2}}.$$

Выводы

Полученная модель позволяет рассчитать электрохимическую составляющую съема материала на операции комбинированного шлифования при обработке деталей из различных материалов.

Исследование операций комбинированного шлифования показывает [5, 6], 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 поверх-

ности детали. Однако с течением времени выходные показатели качества ухудшаются по сравнению с начальным моментом после правки инструмента. За период стойкости шлифовальный инструмент претерпевает существенные изменения. 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. – 176 с. 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. 6. Братан С.М. Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования/ С.М. Братан, Е.А. Владецкая// Вестник НТУ «ХПИ». – Технология в машиностроении: сб. научн. тр. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2008. – №35. – С. 13-22.

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ЗНІМАННЯ МАТЕРІАЛУ НА ОПЕРАЦІЇ КОМБІНОВАНОГО ШЛІФУВАННЯ В ПАСИВУЮЧИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Братан С.М., Новосьолов Ю.К., Мінаєв М.О.

У статті запропоновані математичні моделі, що дозволяють розраховувати знімання матеріалу на операціях комбінованого шліфування в пасивуючому середовищі.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СЪЕМА МАТЕРИАЛА НА ОПЕРАЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО ШЛИФОВАНИЯ В ПАССИВИРУЮЩИХ СРЕДАХ

Братан С.М., Новоселов Ю.К., Минаев М.О.

В статье предложены математические модели, позволяющие рассчитывать съем материала на операциях комбинированного шлифования в пассивирующей среде.

MODELING OF ELECTROCHEMICAL CONSTITUENT OF MATERIAL REMOVAL ON OPERATION OF THE COMBINED GRINDING IN PASSIVATING ENVIRONMENTS

Bratan S.M., Novoselov Y.K., Minaev N.A.

In the paper the mathematical models are offered that allow to calculate the material removal on the operations of the combined grinding in passivating environment.

Рецензент: д.т.н., проф. Матюха П.Г.