

УДК 621.923

И.А. Дымченко, аспирант,

Ю.К. Новоселов, профессор, д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

tm@sevntu.com.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СЪЕМА МЕТАЛЛА ПРИ СУПЕРФИНИШИРОВАНИИ

Математические модели и методики для расчета вероятности удаления материала в зоне контакта заготовки с инструментом при суперфинишировании позволят выявить основные закономерности съема припуска и рассчитать не только параметры единичных срезов, но и параметры микрорельефа обработанной поверхности.

Ключевые слова: абразивная обработка, суперфиниширование, качество поверхности, вероятность удаления (неудаления) материала, кинематический расчет, съем металла.

Метод суперфиниширования является в некотором роде комбинацией и развитием процесса хонингования и притирки. Главное назначение процесса – получение наименьшей шероховатости поверхности без существенного изменения размеров деталей.

Характерными особенностями суперфиниширования по сравнению с другими процессами (доводкой, хонингованием, чистовым шлифованием) являются:

- наличие колебательных (осциллирующих) движений абразивных брусков относительно изделия;
- автоматическое прекращение процесса после достижения заданной шероховатости поверхности.

После суперфиниширования упрочняется поверхностный слой без каких-либо структурных изменений, что существенно улучшает эксплуатационные свойства деталей, работающих в условиях трения скольжения или качения, полностью удаляется волнистость, значительно уменьшается огранка, удаляется дефектный поверхностный слой металла, образовавшийся на предшествующих операциях.

При определении режимов обработки базируются либо на табличных данных, либо исходя из соотношения окружной скорости детали V_d и скорости колебаний бруска V_k (так называемый, угол α , где $\tan \alpha = (V_k + V_{np}) / V_d$). В работе П.Е.Дьяченко [1] приведены примеры траекторий движения режущего зерна при различных режимах обработки.

Однако теоретического обоснования выбора соотношений V_k и V_d не приводится. Такие рекомендации могут быть получены только при изучении закономерностей съема материала инструментом.

В связи с этим целью работы является построение математической модели для оценки закономерностей съема материала при суперфинишировании.

В работе [2] рекомендуется в качестве критерия принимать вероятность съема материала, поскольку состояние в любой точке поверхностного слоя характеризуется двумя событиями: материал в точке может быть либо удален, либо не удален. Каждое событие имеет свою вероятность. Сумма вероятностей событий как событий противоположных равна единице, а значения вероятностей в общем случае могут зависеть от положения точки в граничной области материал – среда.

Согласно [2] вероятность неудаления материала при абразивной обработке для произвольной точки M в переходной (граничной) области материал–среда вычисляется:

$$P(\bar{M}) = P(\bar{M}_0) e^{-a(y)}, \quad (1)$$

где $P(\bar{M}_0)$ – вероятность неудаления материала на рассматриваемом уровне после предшествующей операции; $a(y)$ – показатель, определяющий изменение вероятности неудаления материала на выполняемой операции, где y – расстояние от поверхности заготовки до рассматриваемого уровня.

Если исходная поверхность заготовки имеет микрорельеф нерегулярного профиля, например, после шлифования, то зависимость для расчета вероятности удаления материала может быть представлена в виде:

$$P(M) = 1 - P(\bar{M}) = 1 - e^{-a_0 - a(y)},$$

где a_0 – показатель, определяющий вероятность удаления (неудаления) материала на предшествующей операции.

Для определения изменения вероятности удаления материала на фиксированном уровне y при одном контакте заготовки с инструментом рассмотрим сечение заготовки плоскостью, которая проходит через ее ось.

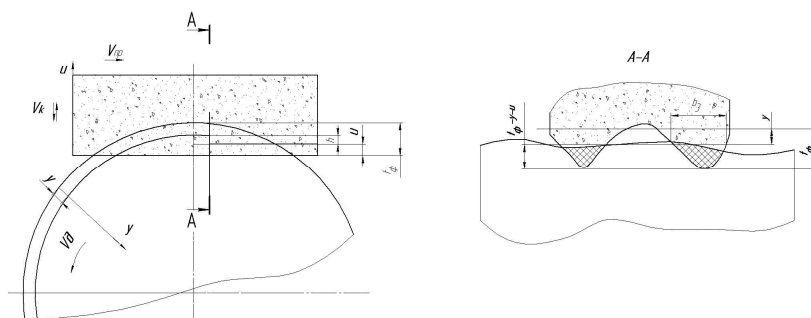


Рисунок 1 – Схема процесса суперфиниширования для расчета вероятности съема материала в зоне контакта заготовки с инструментом

Для фиксированного положения сечения в зоне контакта (рисунок 1) материал заготовки будет удаляться только теми зернами, расстояние до вершин которых от условной наружной поверхности инструмента меньше $t_\phi - y$. Выделим из них зерна с координатой u от условной наружной поверхности по глубине рабочего слоя инструмента, $t_\phi - y \geq u \geq 0$. При прохождении через сечение их профиль пересекается уровнем y на расстоянии $h = t_\phi - y - u$ от вершины.

Ширина контура вершины, соответствующая данному уровню, при моделировании степенной зависимостью вычисляется по уравнению:

$$b_3 = C_b h^m = C_b [t_\phi - y - u]^m,$$

где C_b, m – коэффициенты формы зерна.

За время $\Delta\tau$ сечение поворачивается на угол $\Delta\phi$. Через него проходит участок с длиной дуги $V_\Sigma \Delta\tau$, где V_Σ – скорость резания, которая определится как сумма векторов скоростей детали и бруска (рисунок 2). Исходя из типичной схемы суперфиниширования наружной цилиндрической поверхности, деталь 2 вращается с окружной скоростью V_ϕ , а абразивные бруски 1, установленные в качающейся оправке, совершают возвратно-поступательное (колебательное) движение со скоростью V_k , перемещаясь вдоль оси детали со скоростью V_{np} .

$$\vec{V}_\Sigma = \vec{V}_\phi + \vec{V}_k + \vec{V}_{np}.$$

В свою очередь скорость колебательного движения бруска равна:

$$V_k = A\omega \sin(\omega\tau + \phi),$$

где A – амплитуда колебаний бруска; ω – частота колебаний бруска; ϕ – начальная фаза колебаний бруска.

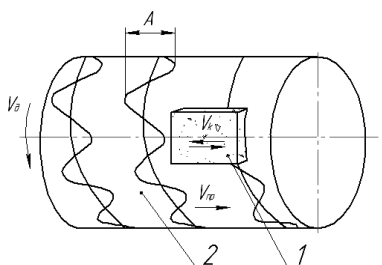


Рисунок 2 – Схема суперфиниширования наружной цилиндрической поверхности: 1 – брусок абразивный; 2 – деталь

Переходя к скалярным величинам, получим:

$$V_\Sigma = \sqrt{V_\phi^2 + (V_k + V_{np})^2} = \sqrt{V_\phi^2 + (A\omega \sin(\omega\tau + \phi) + V_{np})^2}. \quad (2)$$

Из общего числа зерен, прошедших через сечение, ширину профиля b_3 будут иметь зерна, вершины которых расположены в слое круга $1 \times \Delta u V_\Sigma \Delta \tau$. Число таких вершин вычисляется по плотности их распределения по глубине инструмента $f_{\xi u}(u)$:

$$\Delta \lambda = n_3 f_{\xi u}(u) \Delta u V_\Sigma \Delta \tau.$$

Изменение параметра $a(y, \tau)$ уравнения (1) определяется приращением суммы поперечных размеров профилей абразивных зерен:

$$\Delta a(y, \tau) = K_c n_3 b_3 f_{\xi u}(u) \Delta u V_\Sigma \Delta \tau,$$

где K_c – коэффициент стружкообразования, учитывающий, что не весь материал удаляется из объема риски, а часть его вытесняется, образуя по краям риски навалы.

Переходя от дискретной модели к непрерывной, получим интегральное уравнение, определяющее изменение параметра вероятности в зоне контакта:

$$a(y, \tau) = \int_0^{t_\phi - y} \int_{\tau_0}^{\tau_2} K_c n_3 b_3 f_{\xi u}(u) \sqrt{V_\phi^2 + (A \omega \sin(\omega \tau + \phi) + V_{np})^2} du d\tau, \quad (3)$$

где τ_0 и τ_2 – время контакта точки с абразивным бруском, причем τ_0 включает в себя начальную фазу ϕ колебаний бруска, а $\tau_2 = \tau_0 + B/V_\phi$, где B – ширина бруска. Тогда выражение (3) примет вид:

$$a(y, \tau) = \int_0^{t_\phi - y} \int_{\tau_0}^{\tau_2} K_c n_3 b_3 f_{\xi u}(u) \sqrt{V_\phi^2 + (A \omega \sin \omega \tau + V_{np})^2} du d\tau. \quad (4)$$

Для упрощения расчетов и представления результатов в виде аналитических зависимостей целесообразно также выполнять аппроксимацию теоретических законов. В работе [2] предложено аппроксимировать участок кривой распределения активных зерен по глубине инструмента степенной зависимостью вида:

$$f_{\xi u}(u) = C_b u^{\chi-1},$$

где C_b – коэффициент, вычисляемый из условия равенства единице площади, ограниченной кривой распределения:

$$C_b = \frac{\chi}{H_u^\chi},$$

где H_u – глубина слоя рабочей поверхности инструмента, в пределах которой подсчитывается число абразивных зерен n_3 .

Принятые модели вершин зерен и плотности их распределения по глубине позволяют перейти к установлению функциональных связей вероятности неудаления материала от технологических факторов. При подстановке в уравнение (4) полученных выражений b_3 и $f_{\xi u}(u)$ оно принимает вид:

$$a(y, \tau) = \frac{K_c n_3 C_b \chi}{H^\chi} \int_0^{t_\phi - y} \int_{\tau_0}^{\tau_2} u^{(\chi-1)} (t_\phi - y - u)^m \sqrt{V_\phi^2 + (A \omega \sin \omega \tau + V_{np})^2} du d\tau. \quad (5)$$

После интегрирования уравнения (5) по u получим:

$$a(y, z) = \frac{\Gamma(m+1) \Gamma(\chi) (t_\phi - y)^{(\chi+m)} K_c C_b \chi n_3}{\Gamma(m+\chi+1) H^\chi} \int_{\tau_0}^{\tau_0 + B/V_\phi} \sqrt{V_\phi^2 + (A \omega \sin \omega \tau + V_{np})^2} d\tau. \quad (6)$$

Дальнейшее интегрирование уравнения (6) возможно только при известных значениях показателей и составляющих скорости резания. Для упрощения расчетов проведем интегрирование второй части уравнения (6) отдельно. Тогда перемещение резания для точки на поверхности детали определится как:

$$S = \int_{\tau_0}^{\tau_0 + B/V_\phi} \sqrt{V_\phi^2 + (A \omega \sin \omega \tau + V_{np})^2} d\tau. \quad (7)$$

Проведем расчет перемещения резания для точки на поверхности детали типа вал диаметром 60 мм и длиной 200 мм из стали 38ХМЮА (HRC 65 – 67). Исходя из рекомендаций [3], наиболее интенсивное

резание металла осуществляется при $V_0 = V_k = 0,05 \text{ м/с}$. Следовательно, $A = 0,005 \text{ м}$; $\omega = 8 \text{ Гц}$; $V_{np} = 0,008 \text{ м/с}$. Требуемый параметр шероховатости $Ra = 0,04 \text{ мкм}$. Брусек БП20х10х60 34АМ14М1К. Автор утверждает, что при данных режимах происходит наиболее интенсивный сьем материала, исправляется некруглость (огранка) детали.

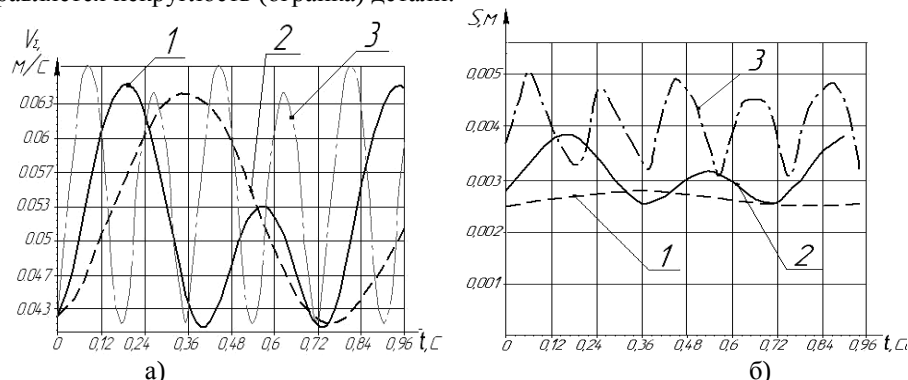


Рисунок 3 – Графическое отображение изменения скорости резания (а) и перемещений резания (б) при суперфинишировании при различных частотах колебания бруска:
кривая 1 – $\omega = 4 \text{ Гц}$; кривая 2 – $\omega = 8 \text{ Гц}$; кривая 3 – $\omega = 16 \text{ Гц}$

Однако при анализе данных режимов с помощью уравнений (2) и (7) (расчетные значения основных точек представлены в таблице 1), выяснилось, что колебания скорости резания в пределах $0,01 \text{ м/сек}$ (рисунок 3,а, кривая 2) приводят к снижению на треть величины перемещений резания точки (рисунок 3,б, кривая 2) и съема металла соответственно. При длительной обработке это может приводить к снижению качества поверхности, появлению волнистости.

Таблица 1 – Расчетные данные

Величина колебаний, Гц	Время контакта, с	Суммарная скорость, м/с	Перемещение резания, м
4	0,06	0,042	0,0026
	0,48	0,047	0,0028
	0,72	0,0422	0,0025
	0,9	0,042	0,0026
8	0,06	0,0423	0,0031
	0,48	0,0477	0,0032
	0,72	0,0418	0,0025
	0,9	0,063	0,0037
16	0,06	0,0418	0,0056
	0,48	0,046	0,0048
	0,72	0,059	0,0029
	0,9	0,057	0,0030

Для расчета показателя, определяющего изменение вероятности неудаления материала на выполняемой операции при первом контакте бруска с заготовкой, принимаем $\chi = 1,5$, $m = 0,5$, $K_c = 0,9$, $\rho_3 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $n_3 = 6,25 \cdot 10^6 \text{ зерен/м}^2$, $t_\phi = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Расчет выполним по формуле (5) для уровня $y = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ при $\omega_1 = 4 \text{ Гц}$, $\omega_2 = 8 \text{ Гц}$, $\omega_3 = 16 \text{ Гц}$. Показатель a_0 определим согласно рекомендаций [2] (равен 1,2).

Таблица 2 – Расчет вероятности удаления (неудаления) материала при различных частотах колебаний бруска

	Частоты колебаний бруска, Гц		
	$\omega_1 = 4 \text{ Гц}$	$\omega_2 = 8 \text{ Гц}$	$\omega_3 = 16 \text{ Гц}$
Вероятность удаления материала	0,66	0,61	0,62

Предложенные математические модели выявляют основные закономерности съема припуска при суперфинишировании и показывают зависимость вероятности съема металла от частоты колебаний бруска при обработке.

Дальнейшие исследования влияния фактической площади контакта инструмента с заготовкой, усилия прижима инструмента на фактическую глубину микрорезания t_ϕ позволят установить оптимальные требования к режимам обработки для достижения необходимого качества поверхности, удаления дефектного слоя поверхности детали, образовавшегося на предшествующих операциях обработки.

Библиографический список

1. Дьяченко П.Е. Современные направления в области обеспечения высокого качества поверхности детали / П.Е. Дьяченко. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 64 с.
2. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К.Новоселов. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. — 232 с.
3. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник / отв. ред. А.Н. Резников [и др.]. — М.: Машиностроение, 1977. — 391 с.

Поступила в редакцию 20.01.2010 г.