

Ф. В. НОВИКОВ

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ СРЕЗА И ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ КРУГЛОМ МНОГОПРОХОДНОМ ШЛИФОВАНИИ

Процесс съема припуска и формообразование поверхностей при шлифовании характеризуется взаимодействием обрабатываемого металла с бесконечным множеством зерен круга, в результате которого происходит упругое и пластическое деформирование металла, отделение мельчайших по размерам стружек и образование по обе стороны от риски-царапины навалов, наложение срезов от зерен и износ рабочей поверхности круга. Очевидно, учесть в математической модели все явления, сопровождающие процесс шлифования, из-за сложности их аналитического представления невозможно, и поэтому исследователи в своих работах, как правило, исходят из упрощенных кинематических расчетных схем, в которых режущие зерна упорядоченно расположены на рабочей поверхности круга, имеют одинаковую геометрическую форму, размеры и с равной вероятностью участвуют в резании. Шлифовальный круг уподобляется фрезе, каждый зуб которой представляет собой режущий профиль в поперечном сечении круга. Контактируя с изделием, эти зубья поочередно оставляют на нем отдельные риски-царапины, соответствующие профилю зерна, которые, накладываясь и перекрываясь по мере подключения в работу новых режущих профилей, приводят к съему припуска и образованию шероховатой обработанной поверхности. На основе упрощенной расчетной схемы шлифования проф. Е. Н. Масловым [1] разработана геометрическая теория шлифования, в которой поверхность шлифовального круга описывается одним параметром — средним расстоянием между режущими зернами, а процесс резания — средней толщиной единичного среза

$$a_z = \frac{v_{изд}}{60v_{кр}} \left(\frac{D+d}{dDt_{cp}} \right)^{0,5} t_{cp} l_{cp} k, \quad (1)$$

где $v_{изд}$; $v_{кр}$ — скорости изделия и круга, м/мин; D , d — диаметры изделия и круга, мм; l_{cp} — расстояние между абразивными зернами, мкм; t_{cp} — фактическая глубина шлифования, мм/ход.

Влияние продольной подачи учитывается поправочным коэффициентом k , определяемым из условия равновероятного перекрытия единичных срезов. Наложение срезов по глубине шлифования (эффект многопроходности) в геометрической модели не рассматривается, что значительно упрощает расчетную схему

и в недостаточной степени отражает те специфические особенности алмазно-абразивного инструмента, отличающие его от других режущих инструментов.

В последние годы наметилась тенденция аналитического описания процесса шлифования с применением современного математического аппарата теории вероятностей, который поднимает исследования в области кинематики шлифования на качественно новый уровень и позволяет разработать единый подход к раскрытию механизма формообразования поверхностей и более правильно провести расчет основных параметров процесса шлифования.

В статье приведены результаты выполненных на базе методов теории вероятностей аналитических исследований закономерностей массового съема металла зёрнами круга, рассчитаны максимальная толщина единичного среза и максимальная высота шероховатости обработанной поверхности для круглого продольного многопроходного шлифования.

Первоначально рассмотрим закономерности удаления металла с изделия при шлифовании кругом формы ПП с продольной подачей, V_1 , мм/об, в p раз меньшей его ширины $V = p \cdot V_1$. В этом случае шлифовальный круг за один продольный ход стола будет p раз контактировать с фиксированным осевым сечением изделия, увеличивая с каждым последующим контактом вероятность удаления металла с его поверхности. Для аналитического описания такого характера контакта круга с изделием воспользуемся математической моделью процесса шлифования с продольной подачей V_1 , равной ширине круга V , учитывающей многопроходность образования профиля на обрабатываемой поверхности изделия и предложенной в работе [2]. Из всей совокупности элементарных цилиндрических оболочек снимаемого припуска выделим произвольную оболочку, на которой после n проходов круга образовалась относительная полнота профиля $\epsilon(y)$, описываемая зависимостью [2]

$$\epsilon_n(y) = 1 - e^{-\frac{\gamma \sqrt{2} \lg \gamma k v_{кр}}{3b v_{изд}} \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \left[\frac{(z_{нт} - y)^2}{2\sqrt{z_{л1}}} + \sum_{i=0}^{n-2} z_{i\tau}^{5/2} \right]}, \quad (2)$$

где γ — угол при вершине зерна; k — поверхностная концентрация зёрен, шт/мм²; b — максимальная высота выступления зёрен над связкой, мм; $v_{кр}$, $v_{изд}$ — скорости круга и изделия; R_1 , R_2 — радиусы изделия и круга; $z_{нт} = z_{\tau} + (n-1)z$, $z_{i\tau} = z_{\tau} + iz$, z — глубина шлифования; z_{τ} — координата текущей оболочки $0 < z_{\tau} < z$.

Приведенная зависимость (2) останется неизменной при описании первого контакта участка круга шириной V_1 с элементарной оболочкой. Относительную полноту профиля при втором контакте $\epsilon_2(y)$ получим вероятностным умножением независи-

мых случайных функций $\phi_1(y)$ и $\phi_2(y)$, первая из которых характеризует вероятность неснятого металла при первом контакте круга с оболочкой и равна $\phi_1(y) = 1 - \varepsilon_1(y)$, вторая, — вероятности неснятого металла при втором контакте без учета съема металла при первом контакте, $\phi_2(y) = 1 - \varepsilon_2^*(y) = 1 - \varepsilon_1(y)$.

Тогда

$$\varepsilon_2(y) = 1 - \phi_1(y)\phi_2(y) = 1 - e^{-\frac{2\sqrt{2} \operatorname{tg} \gamma kv_{\text{кр}}}{3bv_{\text{изл}} \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}} \left[\frac{(z_{\text{нт}} - y)^3}{2\sqrt{z_{\text{нт}}}} + \sum_{i=0}^{n-2} z_{i\tau}^{5/2} \right]}. \quad (3)$$

Относительная полнота профиля при третьем контакте $\varepsilon_3(y)$ определится аналогичным образом:

$$\varepsilon_3(y) = 1 - \phi_1(y)\phi_2(y)\phi_3(y), \text{ где } \phi_3(y) = 1 - \varepsilon_3^*(y) = 1 - \varepsilon_1(y)$$

После преобразований имеем

$$\varepsilon_3(y) = 1 - e^{-\frac{3\sqrt{2} \operatorname{tg} \gamma kv_{\text{кр}}}{3bv_{\text{изл}} \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}} \left[\frac{(z_{\text{нт}} - y)^3}{2\sqrt{z_{\text{нт}}}} + \sum_{i=0}^{n-2} z_{i\tau}^{5/2} \right]}. \quad (4)$$

Относительная полнота профиля при p контакте примет вид

$$\varepsilon_p(y) = 1 - e^{-\frac{p\sqrt{2} \operatorname{tg} \gamma kv_{\text{кр}}}{3bv_{\text{изл}} \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}} \left[\frac{(z_{\text{нт}} - y)^3}{2\sqrt{z_{\text{нт}}}} + \sum_{i=0}^{n-2} z_{i\tau}^{5/2} \right]}. \quad (5)$$

Глубина внедрения элементарной цилиндрической оболочки в рабочую поверхность круга, при которой наступит полный сдем металла с ее поверхности, определится по методике, приведенной в работе [2]:

$$H = \sqrt[3]{2} \sqrt[5]{z_{\text{нт}}} \sqrt[3]{\frac{1}{A} - \sum_{i=0}^{n-2} z_{i\tau}^{5/2}}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{A} = \frac{9bv_{\text{изл}} \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{\sqrt{2} p \operatorname{tg} \gamma kv_{\text{кр}}}.$$

Выражая $k = 3m(1 - \varepsilon)/200\pi\bar{x}^2$ и $b = (1 - \varepsilon)\bar{x}$ [3], где \bar{x} — зернистость, m — объемная концентрация, $(1 - \varepsilon)$ — коэффициент, определяющий прочность удержания зерна в связке, получим окончательно

$$1/A = \frac{600\pi\bar{x}^3 v_{\text{кр}} \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{\sqrt{2} p \operatorname{tg} \gamma m v_{\text{кр}}}. \quad (7)$$

Максимальное значение H_{\max} , соответствующее максимальной толщине среза, получим, решив следующее равенство:

$$H_{\max} = \sqrt[3]{2} \cdot \sqrt[6]{H_{\max}} \cdot \sqrt[3]{1/A - \sum_{i=0}^{n-2} z_{it}^2 \epsilon_{\text{экстр}}^2} \quad (8)$$

Расчет производится численным методом путем перебора H_{\max} до значения, обеспечивающего выполнение равенства (8). Для этого произвольно назначается значение H_{\max} и определяется $n = H_{\max}/z$ и $z_{it \text{ экстр}} = H_{\max} - (n-1)z$. В случае невыполнения равенства (8) необходимо изменить значение H_{\max} и расчет повторить.

При расчетах возможно отсутствие значения H_{\max} , обеспечивающего выполнение (8), что может иметь место при стабилизации $\epsilon(y)$ за 2 прохода. В этих условиях расчет H_{\max} следует вести по другому равенству, перебирая координаты оболочек $0 < z_t < z$ и $0 < i < n-2$:

$$1/A - (1 + 5z_{it \text{ экстр}}) \sum_{i=0}^{n-2} z_{it}^2 \epsilon_{\text{экстр}}^2 = 0, \quad (9)$$

где $z_{it \text{ экстр}} = z_t + (n-1)z$; $z_{it} = z_t + iz$. Данные таблицы совпадают с расчетами проф. Е. Н. Маслова [1]. Однако, несмотря на одинаковый характер изменения H_{\max} , процесс формообразования поверхностей при многопроходном продольном шлифовании, описанный на базе вероятностных методов, подчиняется более сложным закономерностям, чем это принято в геометрической теории шлифования. Так, согласно (1), между a_z и продольной подачей существует вполне однозначный характер связи, не зависящий от остальных параметров шлифования, в то время как по (8) все входящие параметры взаимозависимы друг с другом. Многопроходность шлифования, которая в геометрической модели не учитывается, как показывают вероятностные расчеты, оказывает значительное влияние на характер съема металла и участие зерен в резании.

Неравномерность нагруженности отдельных участков круга приведет к неравномерному износу круга по его ширине и образованию ступенчатого заборного конуса (рис. 1), который после приработки будет подчиняться одинаковому линейному износу по всей длине. Процесс съема припуска и формообразования поверхностей в этих условиях примет еще более сложный характер. Смещение срезов по глубине шлифования происходит от продольной многопроходности обработки и от разновысотного расположения режущих участков круга. За один проход круга каждый режущий участок снимет слой металла толщиной $\Delta z = z/p$. Математическую модель такой схемы формообразования можно представить шлифованием с условной поперечной подачей Δz кругом шириной B_1 . Для определения $\epsilon(y)$

воспользуемся зависимостью (2), принимая вместо z величину Δz . Алгоритм расчета H_{\max} остается прежним с той разницей, что в (8) и (9) параметр z следует заменить Δz и $1/A$ принять в виде:

$$1/A = \frac{600 \pi x^3 v_{\text{изд}} \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}}{\sqrt{2 \operatorname{tg} \gamma m v_{\text{кр}}}}$$

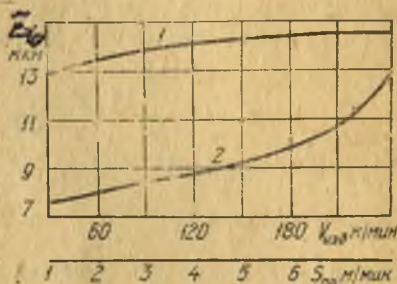
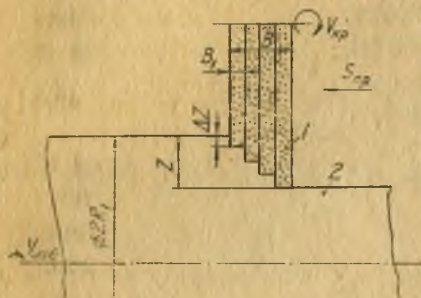


Рис. 1. Схема взаимодействия круга с изделием при многопроходном круглом продольном шлифовании:

1 — круг; 2 — изделие

Рис. 2. Зависимость z_{T_0} от скорости изделия 1 и продольной подачи 2. Исходные данные:

$\gamma = 45^\circ$, $X = 100$ мкм, $m = 100\%$, $R_1 = 100$ мм, $R_2 = 150$ мм, $v_{\text{кр}} = 30$ м/с, $Z = 4$ мкм, I — $s_{\text{пр}} = 8$ м/мин, 2 — $v_{\text{изд}} = 30$ м/мин

ρ	1	2	3	4
		I		
$s_{\text{пр}}$ м/мин	8	4	2	1
H_{\max} мкм	14	11,6	8,5	7,8
		II		
$v_{\text{изд}}$ м/мин	30	60	120	240
H_{\max} мкм	14	14,3	14,6	14,7

Примечание. Значения H_{\max} ($x = 100$ мкм, $m = 100\%$, $v_{\text{кр}} = 30$ м/с, $Z = 4$ мкм, $R_1 = 100$, $R_2 = 150$ мм, в том числе для I — $v_{\text{изд}} = 30$ м/мин, для II — $s_{\text{пр}} = 8$ м/мин).

В таблице приведены результаты расчета H_{\max} в зависимости от ρ при $v_{\text{изд}} = \text{const}$. Как следует из табл. 1, с увеличением ρ , что соответствует уменьшению $s_{\text{пр}}$, м/мин, наблюдается падение H_{\max} . Такая закономерность объясняется образованием более плотного профиля за счет увеличения числа контактов круга с фиксированным сечением изделий, хотя число зерен, уча-

ствующих в резании, остается постоянным. Противоположная картина наблюдается при увеличении ρ путем повышения $v_{изд}$, считая $s_{пр}$ неизменной, H_{max} в этом случае непрерывно возрастает, что снижает эффективность шлифования.

Установим влияние $v_{изд}$ и $s_{пр}$ на максимальную высоту микронеровностей обработанной поверхности $z_{т_0}$, которую получим из условия [3] $H(z_{т_г_{вх}}) = 0$ (10), где $z_{т_г_{вх}}$ — координата оболочки, полный профиль у которой образуется в момент входа ее в рабочую поверхность круга.

Решая совместно (8) и (10), имеем

$$1/A = \sum_{i=0}^j z_{т_г_{вх}}^{5/2} \quad (11)$$

Путем перебора $0 < z_{т_г_{вх}} < z$ и j добиваемся равенства (11) и находим $z_{т_0}$.

На рис. 2 показано изменение $z_{т_0}$ в зависимости от $v_{изд}$ и $s_{пр}$, из которого следует, что увеличение $v_{изд}$ и $s_{пр}$ вызывают одинаковый характер изменения $z_{т_0}$, хотя при увеличении $v_{изд}$ число контактов круга с сечением изделия растет, а при увеличении $s_{пр}$ — падает.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными алмазного шлифования твердого сплава ВК15 показало их расхождение в пределах 30—50%, что вызвано, главным образом, принятой упрощенной конусообразной формой режущих зерен. При экранировании таких зерен на диаметрально плоскость круга образуется менее плотный профиль по сравнению с реально существующим. Однако, несмотря на имеющиеся расхождения, полученные расчетные зависимости следует считать достоверными, так как даже без учета разнообразной геометрической формы и ориентации алмазных зерен в связке, физических закономерностей отделения стружек и тепловых явлений в необходимой степени отражает сложный характер процесса шлифования. Таким образом, выполненные исследования свидетельствуют о значительном месте кинематики формообразования в процессе шлифования и необходимости его анализа с позиций методов теории вероятностей.

Список литературы: 1. Маслов Е. Н. Механизм работы абразивного зерна при шлифовании. — Основные вопросы высокопроизводит. шлифования. — М.: Машгиз, 1960, с. 3—17. 2. Раб А. Ф., Новиков Ф. В. Оптимизация процесса круглого продольного шлифования по предельной кинематической производительности. — Резание и инструмент, 1981, вып. 26, с. 62—66. 3. Абразивная и алмазная обработка. Справочник/Под ред. проф. А. Н. Резникова. — М.: Машиностроение. — 390 с.

Поступила в редколлегию 03.02.82.