

Ф. В. НОВИКОВ, канд. техн. наук

**РАСЧЕТ ШЕРОХОВАТОСТИ ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ
С УЧЕТОМ СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЖУЩЕГО РЕЛЬЕФА
АЛМАЗНОГО КРУГА**

Шероховатость обработанной поверхности — важнейший показатель эффективности алмазного шлифования, поэтому разработке методов ее расчета уделяется большое внимание. Используя современные математические методы теории вероятностей, в ряде работ [1—3] получили аналитические зависимости для R_a , R_{max} и других параметров шероховатости обработанной поверхности, увязанных с режимными и геометрическими параметрами шлифования. Задавая определенные исходные данные, можно рассчитать и спрогнозировать оптимальный режим шлифования. Распространить полученные решения на оптимизацию характеристик алмазного круга, включая марку связки и зерен, до настоящего времени не удавалось, что связано с отсутствием в расчетных зависимостях ряда физических параметров, учитывающих физико-механические свойства зерен, связки и обрабатываемого материала. Такое несоответствие практики и теории шлифования обусловлено принятым в расчетных схемах допущением, что режущий рельеф круга в процессе обработки остается исходным и неизменным. Многочисленные экспериментальные исследования [4, 5] показали, что режущий рельеф круга определяется условиями шлифования и различен для каждого режима шлифования, характеристики круга и т. д. Следовательно, более точный расчет шероховатости шлифованной поверхности возможен с учетом установившегося режущего рельефа круга, закономерности образования которого установлены в работе [6].

Для решения такой задачи воспользуемся расчетной схемой круглого продольного шлифования с $S_d=1$ (S_d — долевая продольная подача), описанной в работе [3]. Снимаемый припуск представлен пакетом элементарных бесконечно тонких оболочек, полный срез которых в слое зерен происходит по линии AB , характеризующей по аналогии с точением вероятностную поверхность резания. Как следует из рис. 1, a , для каждой оболочки существует своя максимальная глубина внедрения в рабочую поверхность круга $H_{max}(z_T)$, при достижении которой оболочка полностью срезается. По мере удаления оболочки от наружного диаметра изделия величина $H_{max}(z_T)$ уменьшается. Полный срез оболочек с координатой $z'_T < z_T < t$ происходит в первой половине длины дуги контакта круга с изделием l_1 .

оболочек с координатой $z''_T < z_T < z'_T$ — во второй половине. Полный срез оболочек с координатой $0 < z_T < z''_T$ не успевает пройти, и поэтому они формируют шероховатость обработанной поверхности. Характер изменения полноты профиля (степени среза) на несрезанных оболочках в зависимости от z_T определяет относительную опорную длину профиля обработанной поверхности. Очевидно, на уровне $z_T = z''_T$ относительная опорная длина профиля равна нулю, а на уровне $z_T = 0$ — единице. Ниже уровня $z_T = 0$ идет сплошной металл.

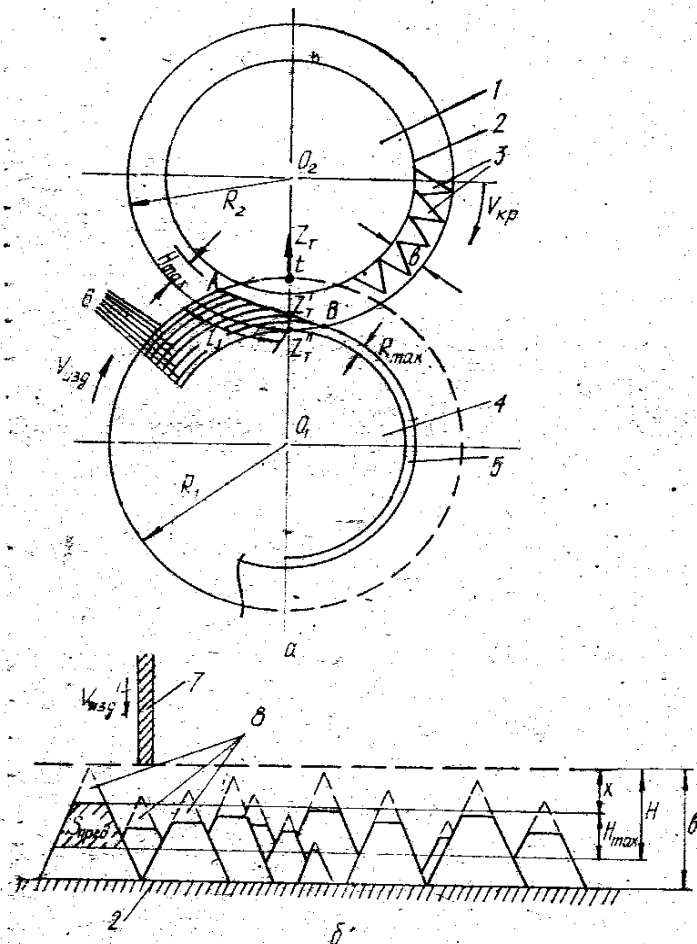


Рис. 1. Расчетные схемы процесса круглого продольного шлифования (а) и параметров установившегося режущего рельефа круга (б):

1 — круг; 2 — уровень связки; 3 — режущие зерна; 4 — обрабатываемое изделие; 5 — шероховатый слой обработанной поверхности изделия; 6 — элементарные цилиндрические оболочки припуска; 7 — сечение изделия, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга; 8 — изношенные части режущих зерен

1 — круг; 2 — уровень связки; 3 — режущие зерна; 4 — обрабатываемое изделие; 5 — шероховатый слой обработанной поверхности изделия; 6 — элементарные цилиндрические оболочки припуска; 7 — сечение изделия, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга; 8 — изношенные части режущих зерен

Элементарная оболочка с координатой z''_T , полный срез которой происходит в момент выхода ее из рабочей поверхности круга, будет определять максимальную высоту остаточных микронеровностей R_{max} . Для такой оболочки (при условном двойном увеличении скорости круга) величина $H_{max}(z''_T)$ всегда равна ее координате z''_T , так как оболочка пересекает плоскость шлифования O_1O_2 :

$$H_{max}(z''_T) = z''_T = R_{max}. \quad (1)$$

Величина $H_{max}(z''_T)$, которая равна максимальной толщине среза, для такой оболочки с учетом износа зерен и стабилизации рельефа круга опишется следующей зависимостью [6]:

$$H_{max} = (1 - \eta) \sqrt[3]{\frac{9bV'_{изд}}{kV_{кр}(1 - \eta^2)}}, \quad (2)$$

где b — максимальная высота выступания зерен над связкой, мм; $V'_{\text{изд}}$ — радиальная скорость внедрения материала в рабочую поверхность круга, мм/с; k — поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности круга, шт/мм²; $V_{\text{кр}}$ — скорость круга, мм/с; $\eta = \frac{X}{H}$ — коэффициент, учитывающий степень износа алмазного зерна до его объемного разрушения или вываливания из связки; X — величина линейного износа зерна до его объемного разрушения или вываливания из связки, мм; H — максимальная глубина внедрения материала в рабочую поверхность круга, отсчитывается от вершины исходного (неизношенного) максимально выступающего зерна, рис. 1, б.

Параметры b и k выражаются через зернистость X и объемную концентрацию m [7]:

$$b = (1 - \epsilon) X; \quad k = \frac{3m(1 - \epsilon)}{200\pi X^2}, \quad (3)$$

где $(1 - \epsilon)$ — коэффициент, учитывающий прочность удержания зерна в связке.

Параметр $V'_{\text{изд}}$ определяется зависимостью [3]:

$$V'_{\text{изд}} = V_{\text{изд}} \sqrt{2t\rho}, \quad (4)$$

где $V_{\text{изд}}$ — окружная скорость изделия, мм/с; t — глубина шлифования, мм; $\rho = 1/R_1 + 1/R_2$, R_1 ; R_2 — соответственно, радиусы изделия и круга, мм.

После преобразований (2) с учетом (3), (4) и решения уравнения (1) по методике, приведенной в работе [3], параметр шероховатости R_{max} примет вид

$$R_{\text{max}} = \sqrt[4]{\frac{(1 - \eta)^4 18 \cdot 10^4 \pi^2 X^6 V_{\text{изд}}^2 \rho}{(1 + \eta)^2 m^3 V_{\text{кр}}^2}}. \quad (5)$$

Анализ (5) показывает, что более сглаженный рельеф круга (соответствующий большему значению η) позволяет снизить максимальную высоту микронеровностей R_{max} . Для исходного (неизношенного) рельефа круга $\eta = 0$, параметр шероховатости R_{max} принимает наибольшее значение, по которому обычно и ведутся расчеты без учета изменения рельефа круга.

Коэффициент η определяется условиями шлифования, и поэтому его необходимо выразить через режим шлифования, характеристику круга и другие параметры шлифования. Исходя из рис. 1, б, коэффициент η можно представить

$$\eta = \frac{X}{H} = \frac{H - H_{\text{max}}}{H} = 1 - \frac{H_{\text{max}}}{H}. \quad (6)$$

В качестве определяющей оболочки в расчетах следует рассматривать периферийную оболочку, у которой максимальная толщина среза H_{\max} наибольшая и которая определяет основную силовую нагруженность зерен, их износ и, следовательно, стабилизацию рельефа круга. В работе [6] параметры H и H_{\max} выражены через предельную площадь среза $S_{\text{пред}}$:

$$H = \frac{9b V'_{\text{изд}}}{k V_{\text{кр}} S_{\text{пред}}}, \quad (7)$$

$$H_{\max} = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{k^2 V_{\text{кр}}^2 S_{\text{пред}}^3}{81 b^2 V_{\text{изд}}'^2}}\right) \frac{9b V'_{\text{изд}}}{k V_{\text{кр}} S_{\text{пред}}}. \quad (8)$$

В свою очередь, $S_{\text{пред}}$ можно представить зависимостью $S_{\text{пред}} = \frac{P}{[\sigma]}$, где P — предельная разрушающая или вываливающая зерно нагрузка, кГ; $[\sigma]$ — условное напряжение резания, кГ/мм².

Общеизвестно, что $[\sigma]$ зависит от толщины среза H_{\max} и поэтому аппроксимируется выражением $[\sigma] = \frac{A}{H_{\max}^n}$, где A — размерный коэффициент, характеризующий прочностные свойства обрабатываемого материала; $n > 1$ — показатель, значение которого в дальнейшем будет установлено.

После преобразований и решения уравнения (8) относительно H_{\max} , получены упрощенные зависимости для определения максимальной толщины среза H_{\max} , параметра H и условного напряжения резания $[\sigma]$:

$$H_{\max} = \left(\frac{600 \pi \bar{X}^3 A^2 V_{\text{изд}} \sqrt{2t\rho}}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot P^2} \right)^{\frac{1}{2n-1}}; \quad (9)$$

$$H = \frac{P}{A} \left(\frac{600 \pi \bar{X}^3 A^2 V_{\text{изд}} \sqrt{2t\rho}}{m V_{\text{кр}} P^2} \right)^{\frac{n-1}{2n-1}}; \quad (10)$$

$$[\sigma] = A \left(\frac{m V_{\text{кр}} P^2}{600 \pi \bar{X}^3 A^2 V_{\text{изд}} \sqrt{2t\rho}} \right)^{\frac{n}{2n-1}}. \quad (11)$$

С учетом (9) и (10) из (6) коэффициент η выразится:

$$\eta = 1 - \frac{A}{P} \left(\frac{600 \pi \bar{X}^3 A^2 V_{\text{изд}} \sqrt{2t\rho}}{m V_{\text{кр}} P^2} \right)^{\frac{2-n}{2n-1}}. \quad (12)$$

В зависимости (12) неизвестны два параметра — P и A . Первый из них P может принимать значение, равное прочности зерна на раздавливание или силе, вываливающей зерно из связки. В настоящей статье ограничимся изучением работы круга в режиме доминирующего объемного разрушения зерен, и поэтому силу P положим равной прочности зерна на раздавли-

вание. Параметр A определяется расчетно-экспериментальным путем, для чего необходимо в (5) с учетом (12) представить базовое экспериментальное значение R_{\max} и соответствующие ему условия шлифования и найти базовое значение A . Для других обрабатываемых материалов (в первом приближении)

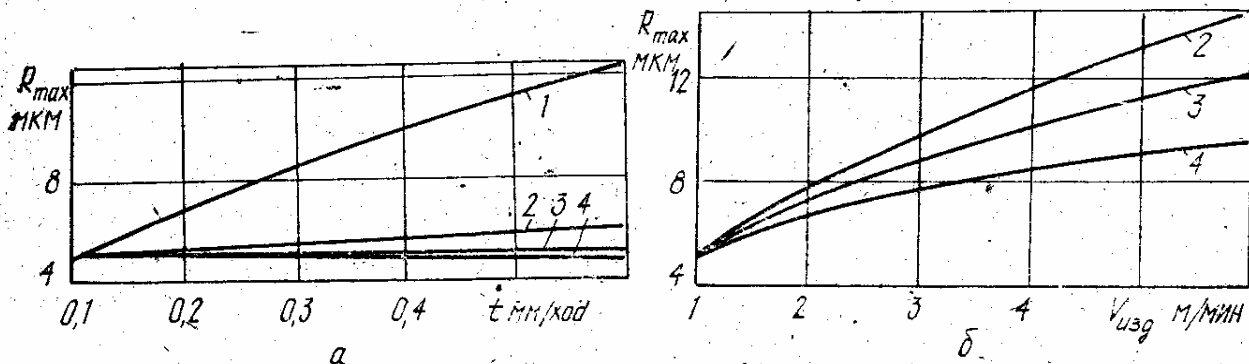


Рис. 2. Зависимости параметра шероховатости R_{\max} от глубины шлифования t (а) и скорости изделия $V_{\text{изд}}$ (б):

1 — $n=1$; 2 — $n=1,5$; 3 — $n=1,7$; 4 — $n=2$. Исходные данные расчета: $V_{\text{кр}}=30$ м/с; $B_1=22,5$ мм/об; $R_1=80$ мм; $R_2=150$ мм; $\bar{X}=250$ мкм; $m=100$ %; $P=0,9$ кгс; а — $V_{\text{изд}}=1$ м/мин; б — $t=0,1$ мм/ход

базовое значение A необходимо увеличить или уменьшить в соответствующее число раз, определяемое соотношением их физико-механических свойств, например, прочностных характеристик, твердости или других параметров, которые хорошо коррелируются с основными закономерностями шлифования.

Анализ расчетных значений R_a с учетом $R_{\max} \approx 5 R_a$ (рис. 2) и экспериментальных значений R_a (таблица) показывает, что наиболее правильно процесс шлифования описывается зависимостью $[\sigma] = \frac{A}{H_{\max}^{1,7}}$, где A для базового твердого сплава ВК15 при

его шлифовании кругом 1А1 300×25×75 АС6 250/200—100 %—МВ1 равно $A=1,42$. Расчет A производился при следующих исходных данных: $V_{\text{кр}}=30$ м/с; $t=0,1$ мм/ход; $B_1=22,5$ мм/об; экспериментальное значение $R_{\max}=5$ мкм. Параметр A зависит от n : для $n=1$ — $A=31,2$; для $n=1,5$ — $A=3,433$; для $n=1,7$ — $A=1,42$; для $n=2$ — $A=0,378$.

Приведенные графики η и X от режимов шлифования (рис. 3) свидетельствуют о незначительной величине линейного износа зерна до его объемного разрушения. В резании используется до 10 % размера зерна, что подтверждает известные результаты по анализу шлама разрушенных в процессе шлифования зерен.

Из (5) и (12) следует, что с увеличением прочности зерна P возрастает коэффициент η и уменьшается параметр шероховатости R_{\max} . Такая закономерность обусловлена тем, что с увеличением P снижается максимальная толщина среза H_{\max} .

$V_{изд}$ м/мин	t мм				
	0,1	0,2	0,3	0,6	1,0
1	—	1,1	1,2	1,5	1,65
2	—	1,2	1,4	1,75	1,9
4	1,6	1,75	1,9	2,15	—
6	1,8	2,0	2,15	—	—

и повышается условное напряжение резания $[\sigma]$, которые в совокупности приводят к росту величины линейного износа зерна до его объемного разрушения X и к образованию на круге бо-

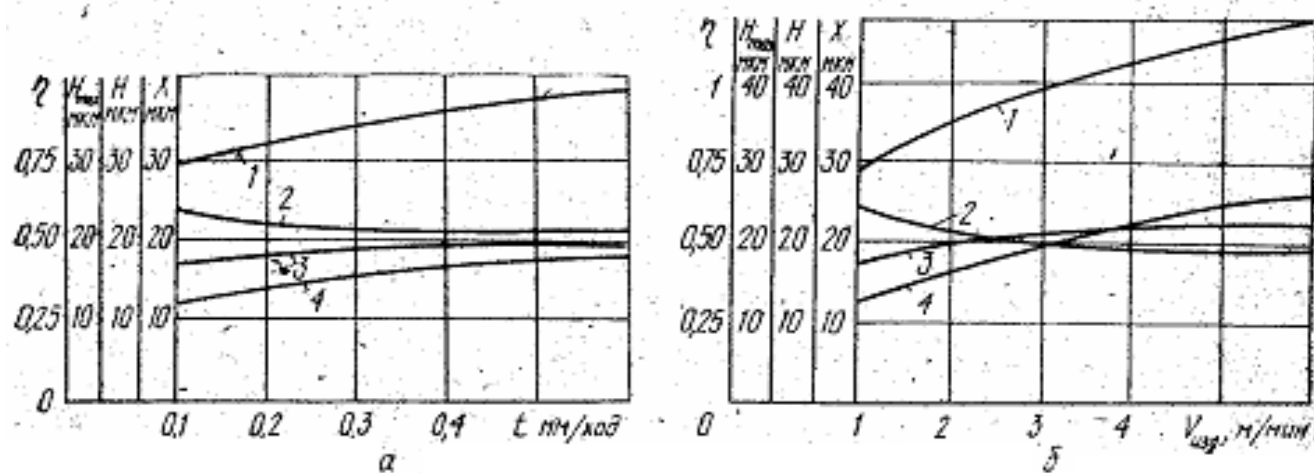


Рис. 3. Зависимости изменения η (2); H_{max} (4); H (1) и X (3) от глубины шлифования t (а) и скорости изделия $V_{изд}$ (б). Исходные данные расчета: $n=1,7$; $A=1,42$; $V_{пр}=30$ м/с; $B_1=22,5$ мм/об; $R_1=80$ мм; $R_2=150$ мм; $X=250$ мкм; $m=100$ %; $P=0,9$ кгс; а — $V_{изд}=1$ м/мин; б — $t=0,1$ мм/ход

лее сглаженного рельефа. Как известно, шлифование таким рельефом позволяет добиться снижения максимальной высоты микронеровностей R_{max} . Механизм влияния прочности обрабатываемого материала A на шероховатость R_{max} несколько иной. С увеличением прочности обрабатываемого материала A уменьшается $[\sigma]$ и возрастает H_{max} , в результате чего снижаются величина линейного износа зерна до его объемного разрушения и площадка износа на нем. Рельеф на круге становится более развитым, и шероховатость возрастает. Аналогичным образом, пользуясь зависимостями (9) — (11), можно провести анализ влияния остальных параметров шлифования на R_{max} .

Необходимо отметить, что в кинематических расчетах [3], без учета стабилизации рельефа, параметр R_{max} оставался неизменным с увеличением глубины шлифования t . Следуя (5) и (12), с увеличением t параметр R_{max} незначительно возрастает, что хорошо согласуется с известными аналогичными экспериментальными зависимостями. В (5) и (12) влияние зернис-

тости круга проявляется двояко: через геометрические размеры зерна \bar{X} и его прочность P , поэтому в расчетах при изменении \bar{X} необходимо в соответствующее число раз изменить прочность зерна P . В качестве расчетного значения \bar{X} следует принимать среднюю зернистость, например, для зернистости 250/200 параметр $\bar{X} = 225$ мкм и т. д.

На шероховатость обработанной поверхности значительное влияние оказывает форма установившегося профиля круга. При шлифовании с $S_d < 1$ на круге может образоваться заборный конус, и тогда расчет R_{\max} ведется по зависимостям (5) и (12). В случае, когда форма профиля круга в процессе шлифования остается прямолинейной, в зависимостях (5) и (12) скорость изделия $V_{\text{изд}}$ необходимо умножить на $S_d = \frac{B_1}{B}$, где $B_1 = 2\pi R_1 \frac{S_{\text{прод}}}{V_{\text{изд}}}$ — продольная подача, мм/об; $S_{\text{прод}}$ — продольная подача, мм/с; B — ширина круга, мм.

В расчетные зависимости не вошли параметры, характеризующие свойства связки. Это обусловлено тем, что рассмотрен случай работы круга в режиме доминирующего объемного хрупкого разрушения зерен. При работе круга в режиме превалирующего вываливания зерен из связки сила P будет определяться прочностью удержания зерен связкой и характеристики связки через P войдут в расчетные зависимости.

Таким образом, расчеты показывают существенное влияние установившегося режущего рельефа круга на шероховатость обработанной поверхности и позволяют оптимизировать не только режимы шлифования, но и характеристики алмазного круга для конкретного обрабатываемого материала.

Список литературы: 1. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. — Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1979. — 232 с. 2. Резников А. Н., Федосеев О. Б. Выбор режимов шлифования синтетическими сверхтвердыми материалами при заданной шероховатости поверхности изделия. — Вестн. машиностроения, 1976, № 6, с. 69—70. 3. Новиков Ф. В., Гуцаленко Ю. Г. Шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании. — В кн.: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении, 1983, с. 52—57. 4. Мишнаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов. — К.: Наук. думка, 1982. — 192 с. 5. Попов С. А., Малевский Н. П., Терещенко Л. М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. — М.: Машиностроение, 1977. — 263 с. 6. Новиков Ф. В. Кинетика образования режущего рельефа алмазного круга в процессе шлифования. — В кн.: Контактные процессы при больших пластических деформациях. — Х., 1982, с. 37—43. 7. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник/Под ред. проф. А. Н. Резникова. — М.: Машиностроение, 1977. — 390 с.

Поступила в редколлегию 08.10.84.