

## К ВОПРОСУ О ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ОБЕСПЕЧЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Асп. А.В. ШИРОКОВ, канд. техн. наук, доц. А.П. ОСИПОЕ

*Представлен вывод зависимости параметра шероховатости  $R_{\max}$  шлифованной поверхности от основных параметров, характеризующих процесс микрорезания, на основе моделирования взаимодействия режущей кромки абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Проведен анализ полученной зависимости. Сформулированы практические рекомендации по выбору оптимального метода правки в зависимости от геометрии режущих кромок абразивных зерен шлифовального круга.*

*The article under discussion deals with the problem of functional dependence of roughness parameter  $R_{\max}$  of ground surface from the other parameters, which characterizing the microcutting process. This dependence is based on the modeling interaction of cutting edge of abrasive grain with workpiece. The analysis of that dependence also took place. The practical recommendations concerning the choice of the effective methods of dressing depending on the geometry of abrasive grains of grinding wheel were also made up.*

Для надежной работы детали в изделии большое значение имеет шероховатость обработанной поверхности, характеризуемая величиной ее микронеровностей. Шероховатость определяет многие процессы, происходящие в поверхностном слое деталей машин [1—5]: процесс изнашивания, процесс усталостного разрушения и т. д.

Формированию шероховатости поверхности при шлифовании уделялось большое внимание со стороны отечественных и зарубежных ученых. Н. В. Носов [1] выделяет два принципиальных подхода к исследованию данного вопроса: первый основан на использовании физической модели образования микронеровностей, второй — на обобщении экспериментальных данных. Однако анализ литературных источников [1—4] показал, что ученые используют, в основном, комбинацию этих двух подходов, проводя исследования влияния различных факторов на качество шлифованной поверхности в два этапа: 1) исследование процесса микрорезания единичным абразивным зерном с использованием физической модели образования единичной риски (парпины); 2) исследование процесса формирования шероховатости путем наложения профиля абразивной поверхности на профиль обрабатываемой поверхности и попытки сформулировать метод получения необходимого ее качества, основанный на обобщении экспериментальных данных. Например, Е. Н. Маслов [2] моделировал режущую кромку абразивного зерна конусом с округленной вершиной (рис. 1). При этом он использовал данную модель в совокупности с экспериментальными исследованиями для качественного анализа влияния различных факторов на шероховатость шлифованной поверхности. Для количественной оценки шероховатости он предлагает эмпирическую зависимость

$$R_a = \frac{C_{Ra} v_d^p t^r s^q k_1 k_2 k_3}{v_{кр}^{III} d^m H^n}, \quad (1)$$

где  $C_{Ra}$  — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала;  $v_d$  — скорость детали;  $v_{кр}$  — скорость шлифовального круга;  $t$  — поперечная подача;  $s$  — продольная подача;  $d$  — диаметр шлифуемой детали;  $H$  — высота абразивного круга;  $k_1$  — коэффициент, учитывающий зернистость шлифовального круга;

$k_2$  — коэффициент, учитывающий состав СОЖ;  $k_3$  — коэффициент, учитывающий влияние зачистных ходов;  $p, z, q, \omega, \mu, n$  — показатели степени.

Л. Н. Филимонов [3], предлагая ту же модель (рис. 2), считает приемлемым использование ее для предварительной количественной оценки ожидаемой высоты неровностей шлифованной поверхности.

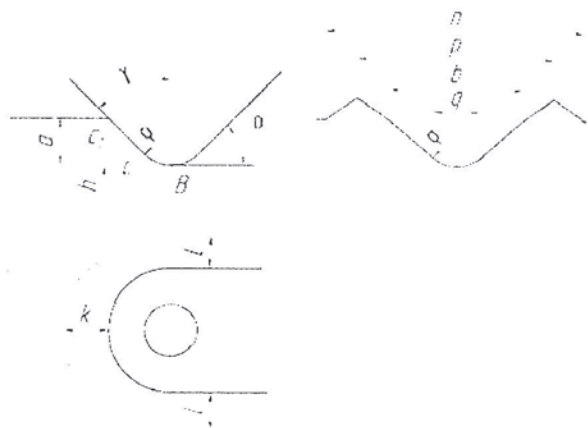


Рис. 1. Схема микрорезания (царапания) материала Е.Н. Маслова

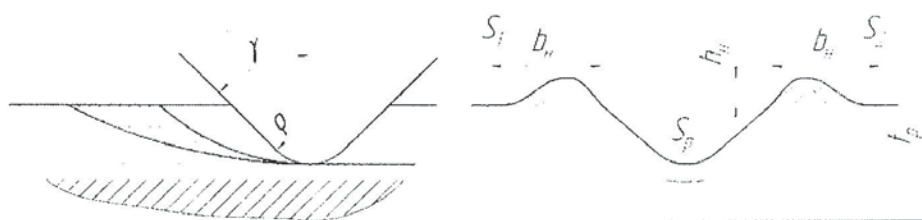


Рис. 2. Модель резания единичным абразивным зерном Л.Н. Филимонова

Однако при переходе к исследованию процесса массового микрорезания (царапания) поверхностных слоев твердых тел он предлагает эмпирическую зависимость для определения шероховатости

$$R_z = h_n e^{-an} + h_n a^n v^{-\delta}, \quad (2)$$

где  $h_n$  — высота элементарного (исходного) режущего профиля, равная высоте рельефа круга;  $n$  — число наложений элементарного режущего профиля на профиль обрабатываемой поверхности;  $\alpha$  — показатель степени;  $v$  — скорость шлифовального круга;  $a$  — средняя толщина среза, получаемого при прерывистом микрорезании единичным абразивным зерном. Об остальных составляющих данной формулы ( $h_n, v, \delta$ ) автор в указанной работе [3] ничего не пишет.

С. Н. Корчак [4] считает «более правильным моделировать рабочие части режущих зерен не в виде сфероидов, а в виде площадок затупления, которые, вероятно, могут иметь и сфероидальный вид. Моделируя механизм взаимодействия шлифовального круга с деталью (рис. 3), он исследует влияние различных факторов на форму и размеры рисок (царапин), а также на их количество, приходящееся на единицу ширины шлифования. Собственно о шероховатости автор в данной главе книги ничего не пишет. В конце своей работы он дает



общие рекомендации по выбору характеристик кругов и режимов шлифования, основанные на экспериментальных данных.

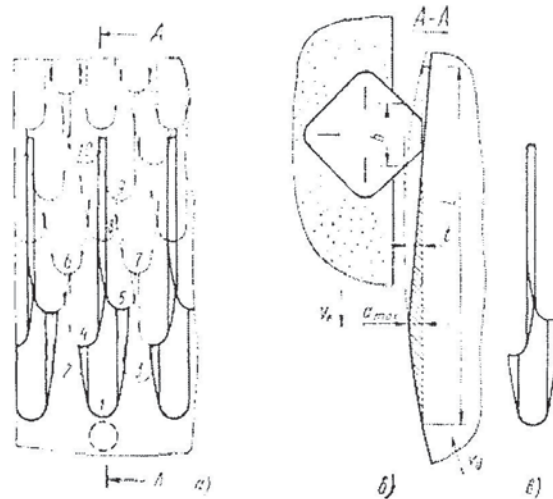


Рис. 3. Идеализированная масштабная схема взаимодействия совокупности зерен круга с деталью С.Н. Корчака: *а* — наложение рисок в зоне контакта; *б* — схема продольного сечения среза; *в* — вид в плане на отдельный срез

Таким образом, анализ литературных источников [1—4] показывает, что имеющиеся зависимости носят преимущественно эмпирический характер. Однако, на наш взгляд, предпочтительнее применение зависимостей, основанных на первом подходе к исследованию формирования качества шлифованной поверхности. Этой же точки зрения придерживается Н. В. Носов [1]. Отсутствие таких зависимостей у многих ученых можно объяснить, вероятно, несовершенством физических моделей резания единичным абразивным зерном:

1. В случае моделирования режущей кромки абразивного зерна в виде конуса с округленной вершиной [2, 3] отсутствует объективная методика определения ее радиуса. Вследствие этого исследование принимают субъективный характер, что является одной из причин лишь качественной оценки влияния радиуса режущей кромки  $\rho$  на шероховатость.

2. Общеизвестно [2, 3], что при микрорезании часть обрабатываемого материала срезается в виде стружки, а часть упруго-пластически деформируется. Следовательно, на передней поверхности режущей кромки нужно выделить зоны резания и упруго-пластической деформации, а также определить критерий этого деления.

3. Общеизвестно [1—5], что линейный износ режущих кромок приводит к изменению картины резания. Однако в моделях [2, 3] его размеры не принимаются во внимание. На наш взгляд, размеры площадки износа влияют на формирование качества шлифованной поверхности.

В соответствии со сказанным выше **цель работы** состоит в разработке математического аппарата, позволяющего определить зависимости параметров шероховатости обрабатываемой поверхности от геометрии режущей кромки абразивного зерна для различных условий резания. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач: 1) выбрать модель резания единичным абразивным зерном; 2) разработать модель формирования шероховатости обрабатываемой поверхности; 3) исследовать полученные зависимости; 4) дать практические рекомендации по использованию полученных зависимостей.

### 1. Определение зависимости параметров шероховатости от геометрии режущей кромки и условий деформирования материала

Представим режущую кромку абразивного зерна параболоидом вращения [5] с уравнением в системе координат  $Oxyz$   $z^2 + x^2 = b^2 y^{2\nu}$  (ось  $Z$  направим в сторону вектора скорости резания  $V$ , ось  $Y$  — нормально обрабатываемой поверхности, ось  $X$  — перпендикулярно этим осям, начало координат  $O$  поместим в вершину режущей кромки). Параметр  $b$  характеризует быстроту нарастания площади сечения режущей кромки с высотой, параметр  $\nu$  — форму образующей. Кроме того, для характеристики геометрии режущей кромки введем параметр  $h_{\text{изн}}$ , определяющий ее линейный износ.

Известно, что процесс резания материалов представляет собой процесс сжатия—сдвига. Введем в рассмотрение мгновенный угол сдвига  $\beta$ , определяющий направление скольжения слоев обрабатываемого материала в момент отрыва [5] (рис. 4). Угол  $\beta$  характеризует физико-механические свойства обрабатываемого материала, а значит, и условия его деформирования.

Рассмотрим процесс микрорезания в центральной плоскости  $ZOY$  в случае поступательного движения режущей кромки, что можно допустить для малого ее перемещения. Проведем касательную к переднему профилю под углом  $\beta$ . Точку касания обозначим через  $B$ . Предположим, что часть переднего профиля, где угол наклона касательной к профилю больше угла сдвига  $\beta$ , будет удалять обрабатываемый материал. Та часть, где угол наклона касательной меньше угла сдвига  $\beta$ , будет упруго-пластически деформировать материал. Проводя подобное разделение переднего профиля в плоскостях, параллельных центральной плоскости  $ZOY$ , можно получить разделение всей передней поверхности на зону резания и зону упруго-пластического деформирования.

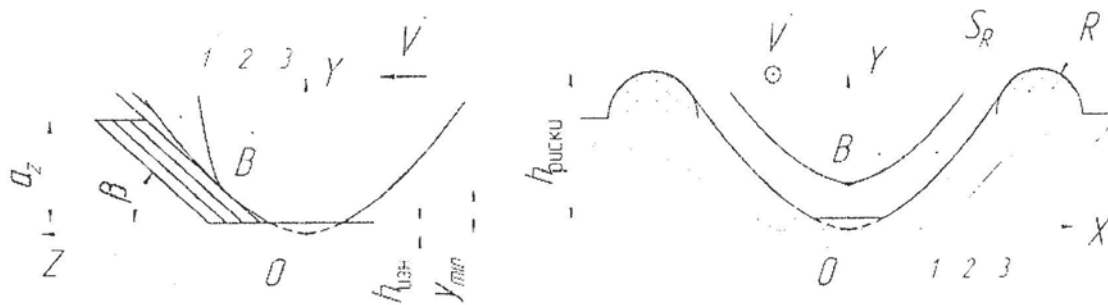


Рис. 4. Предлагаемая модель резания единичной режущей кромкой: 1 — зона резания; 2 — проекция линия разделения передней поверхности на зоны; 3 — зона упруго-пластического деформирования

На рис. 4 часть режущей кромки, расположенная ниже точки  $B$ , только деформирует материал. Обозначим высоту данной зоны через  $y_{\text{мин}}$ . Тогда минимальная глубина внедрения зерна, при которой начнется процесс резания, будет равна

$$a_{z\text{мин}} = y_{\text{мин}} - h_{\text{изн}}. \quad (3)$$

При этом величина линейного износа режущей кромки  $h_{\text{изн}}$  должна быть меньше величины  $y_{\text{мин}}$  ( $h_{\text{изн}} < y_{\text{мин}}$ ). В противном случае процесс микрорезания будет иметь место при любой глубине внедрения зерна в обрабатываемый материал.

Согласно исследованиям [5], величина  $y_{\text{мин}}$  для заданной формы режущей кромки определяется по следующей формуле:



$$y_{\min} = (\operatorname{tg}(\beta)bv)^{\frac{1}{1-\nu}}. \quad (4)$$

Исследования [1—4] показывают, что часть материала, подвергаемого упруго-пластической деформации, выдавливается на обрабатываемую поверхность в виде наплывов, а другая часть упрочняется. При построении математической модели примем допущение, что весь деформируемый материал выдавливается в направлениях, перпендикулярных вектору скорости резания, и образует на обрабатываемой поверхности два наплыва, имеющих в поперечном сечении форму полукругов (рис. 4). В этом случае размер риски в поперечном сечении будет равен

$$h_{\text{риски}} = a_z + R, \quad (5)$$

где  $a_z$  — глубина внедрения режущей кромки;  $R$  — радиус наплыва.

Из (5) следует, что с увеличением глубины внедрения  $a_z$  и высоты наплывов  $R$  возрастает  $h_{\text{риски}}$ . Логично предположить, что заданная режущая кромка, внедрившаяся на большую глубину  $a_z$ , выдавит больший объем материала и образует канавку с большими по высоте наплывами, т. е.

$$R = f(a_z). \quad (6)$$

Следовательно, максимальная шероховатость может быть выражена как функция параметра  $a_z$

$$h_{\text{риски}} = f(a_z). \quad (7)$$

Учитывая, что приведенная выше зависимость (7) — монотонно возрастающая, для определения параметра  $R_{\max}$  шлифованной поверхности нужно исследовать процесс формирования рисков (царапин) наиболее выступающими зернами. При этом

$$h_{\text{риски}} = R_{\max}, \quad (8)$$

$$R_{\max} = a_z + R. \quad (9)$$

Зная  $R_{\max}$ , можно определить такие параметры шероховатости, как  $R_z$  и  $R_a$  [6]:

$$R_z = 0,86R_{\max}, \quad (10)$$

$$R_a = \frac{R_z}{6}. \quad (11)$$

Следует отметить, что Л. Н. Филимонов [3] для предварительной количественной оценки ожидаемой высоты неровностей шлифованной поверхности предлагал использовать подобную зависимость:

$$R_z = ca + h_{\text{н}}, \quad (12)$$

где  $a$  — средняя толщина среза, получаемого при прерывистом микрорезании единичным абразивным зерном;  $h_{\text{н}}$  — максимальная высота наплывов по боковым сторонам шлифовочных рисков;  $c$  — коэффициент пропорциональности.

Н. В. Носов в своей работе [1] тоже приводит подобную формулу:

$$R_z = a_z + h_{\text{нmax}} (\varepsilon_{\text{н.о}} - C_{\text{н}} V_K), \quad (13)$$

где  $a_z$  — глубина внедрения зерна;  $h_{\text{нmax}}$  — максимальная высота наплывов по боковым сторонам шлифовочных рисков;  $\varepsilon_{\text{н.о}}$  — относительная критическая глубина внедрения

зерна;  $V_K$  — скорость шлифовального круга;  $C_{II}$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от вида обрабатываемого материала.

Радиус напльва в (9) можно определить через его площадь  $S_R$

$$R = \sqrt{\frac{2S_R}{\pi}}. \quad (14)$$

Для определения площади  $S_R$  рассмотрим движение режущей кромки через произвольную плоскость А—А, параллельную центральной плоскости ХОУ. На рис. 5, а видно, что сначала в контакт с материалом входит зона резания передней поверхности. В ходе дальнейшего движения режущей кромки в контакт с материалом входит зона деформирования (рис. 5, б). Так как согласно ранее принятому допущению весь деформируемый материал выдавливается в направлениях, перпендикулярных вектору скорости резания, то перераспределение материала в напльвы будет происходить в пределах рассматриваемой

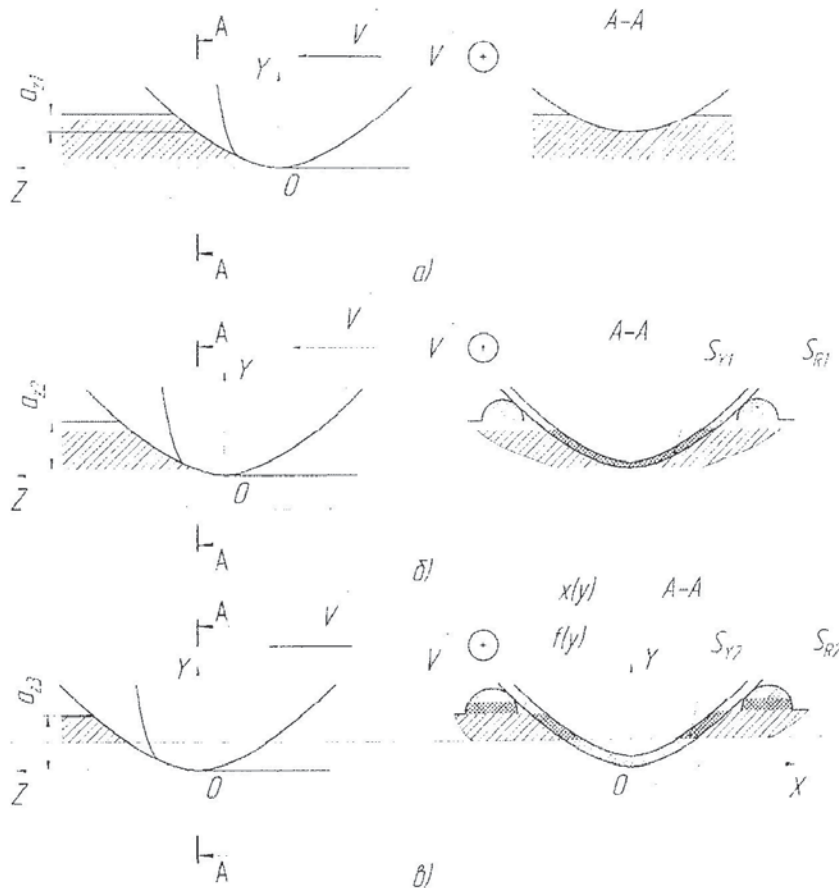


Рис. 5. Процесс формирования риски (царапины) при внедрении единичной режущей кромкой абразивного зерна

плоскости А—А и суммарная площадь выдавленного материала будет равна суммарной площади напльвов:

$$2S_R = 2S_y, \quad (15)$$

и

$$R = \sqrt{\frac{2S_y}{\pi}}. \quad (16)$$

Из полученного равенства (16) следует, что радиус наплывов достигнет максимального значения, когда вся зона деформирования пройдет через рассматриваемую плоскость А—А (рис. 5, в). Иными словами, когда произойдет совмещение плоскости А—А с центральной плоскостью ХОУ режущей кромки.

Для определения площади  $S_y$  необходимо рассмотреть три случая возможного взаимодействия режущей кромки с обрабатываемым материалом.

$$1. a_z + h_{изн} \leq y_{min}.$$

В этом случае имеет место только процесс выдавливания материала (рис. 6). Площадь  $S_y$  определим по следующей формуле:

$$S_y = \int_{h_{изн}}^{(a_z + h_{изн})} f(y) dy, \quad (17)$$

где  $f(y)$  — уравнение образующей режущей кромки. Из модели режущей кромки следует:

$$f(y) = by^n. \quad (18)$$

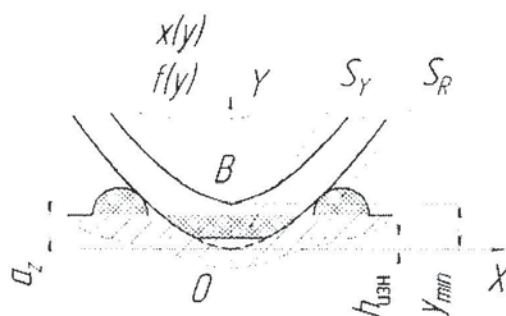


Рис. 6. Образование шероховатости в случае только упруго-пластической деформации

$$2. h_{изн} \geq y_{min}.$$

В этом случае имеют место процесс выдавливания материала и процесс собственно резания (рис. 7). Площадь  $S_y$  определим по следующей формуле:

$$S_y = \int_{h_{изн}}^{(a_z + h_{изн})} f(y) dy - \int_{h_{изн}}^{(a_z + h_{изн})} x(y) dy, \quad (19)$$

где  $x(y)$  — уравнение проекции линии разделения передней поверхности режущей кромки на зоны, которое, согласно [5], имеет следующий вид:

$$x(y) = \sqrt{b^2 y^{2v} - (\text{tg} \beta b^2 v y^{2v-1})^2}. \quad (20)$$

$$3. \begin{cases} h_{изн} < y_{min}; \\ a_z + h_{изн} > y_{min}. \end{cases}$$

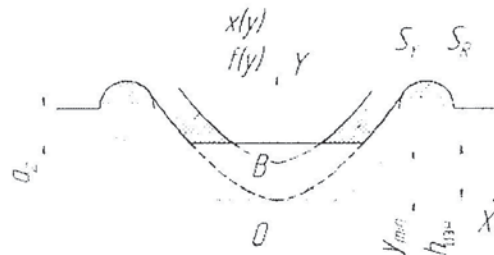


Рис. 7. Образование шероховатости, когда линейный износ  $h_{\text{изн}}$  превышает величину  $y_{\text{мин}}$

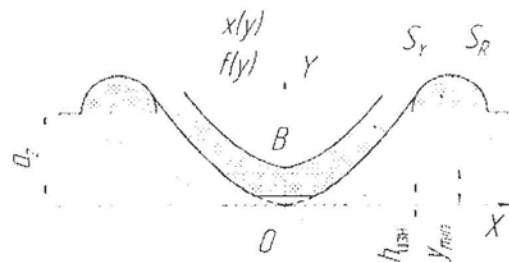


Рис. 8. Образование шероховатости, когда износ  $h_{\text{изн}}$  не превышает величину  $y_{\text{мин}}$

В этом случае имеют место процесс выдавливания материала и процесс собственно резания (рис. 8). Площадь  $S_y$  определим по следующей формуле:

$$S_y = \int_{h_{\text{изн}}}^{(a_z + h_{\text{изн}})} f(y) dy - \int_{y_{\text{мин}}}^{(a_z + h_{\text{изн}})} x(y) dy. \quad (21)$$

Формулы (17), (19), (21) для определения площади  $S_y$  сведем в одну систему:

$$S_y = \begin{cases} \int_{h_{\text{изн}}}^{(a_z + h_{\text{изн}})} f(y) dy & \text{если } a_z + h_{\text{изн}} \leq y_{\text{мин}} \\ \int_{h_{\text{изн}}}^{(a_z + h_{\text{изн}})} f(y) dy - \int_{h_{\text{изн}}}^{(a_z + h_{\text{изн}})} x(y) dy & \text{если } h_{\text{изн}} \geq y_{\text{мин}} \\ \int_{h_{\text{изн}}}^{(a_z + h_{\text{изн}})} f(y) dy - \int_{y_{\text{мин}}}^{(a_z + h_{\text{изн}})} x(y) dy & \text{если } \begin{cases} h_{\text{изн}} < y_{\text{мин}}; \\ a_z + h_{\text{изн}} > y_{\text{мин}}. \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

### Качественный анализ влияния параметров $b, v, h_{\text{изн}}, a_z$ и $\beta$ на шероховатость шлифованной поверхности

В ходе данного анализа необходимо решить следующие задачи.

1. Определить направление изменения значений функции  $R_{\text{max}}(b, v, h_{\text{изн}}, a_z, \beta)$  при увеличении (уменьшении) аргументов. Из формул (9), (16) и (22) видно, что увеличение значений геометрического параметра режущей кромки  $b$ , глубины ее внедрения в обрабатываемый материал  $a_z$  и мгновенного угла сдвига  $\beta$  ведет к увеличению шероховатости. Влияние параметров  $v$  и  $h_{\text{изн}}$  неоднозначно и требует дополнительных исследований.



2. Определить степень влияния аргументов  $b$ ,  $v$ ,  $h_{\text{изн}}$ ,  $a_z$ ,  $\beta$  на функцию  $R_{\text{max}}(b, v, h_{\text{изн}}, a_z, \beta)$ . Для этого построим графики функции  $D(x_1, x_2) = \left| \frac{R'_{\text{max}}(x_1)}{R'_{\text{max}}(x_2)} \right|$  при различном сочетании параметров  $b$  и  $v$ , определяющих различную геометрию режущей кромки абразивного зерна. При этом  $x_1$  и  $x_2$  — сравниваемые параметры. Если  $D(x_1, x_2) > 1$ , то влияние параметра  $x_1$  на шероховатость  $R_{\text{max}}$  сильнее. Если  $D(x_1, x_2) \in [0; 1)$  — сильнее влияние  $x_2$ .

Исследования функции  $R_{\text{max}}(b, v, h_{\text{изн}}, a_z, \beta)$  проводились в среде математического пакета MathCAD. При этом аргументам функции присваивались следующие значения:  $v = 0 \dots 1$ , что соответствует реальной форме режущей кромки (выпуклая форма);  $b = 1 \dots 10$  — такие значения были получены при исследовании фотографий абразивных зерен. Режущие кромки рассматривались как параболоиды вращения;  $h_{\text{изн}} = 10$  мкм;  $a_z \leq 50$  мкм;  $\beta = 12 \dots 28^\circ$  — в этом интервале находятся значения мгновенных углов сдвига для цинка, алюминия, стали, чугуна.

Для определения влияния геометрического параметра  $v$  и износа режущей кромки  $h_{\text{изн}}$  на шероховатость построим график зависимости  $R_{\text{max}}(v)$  для различных значений  $h_{\text{изн}}$  (рис. 9).

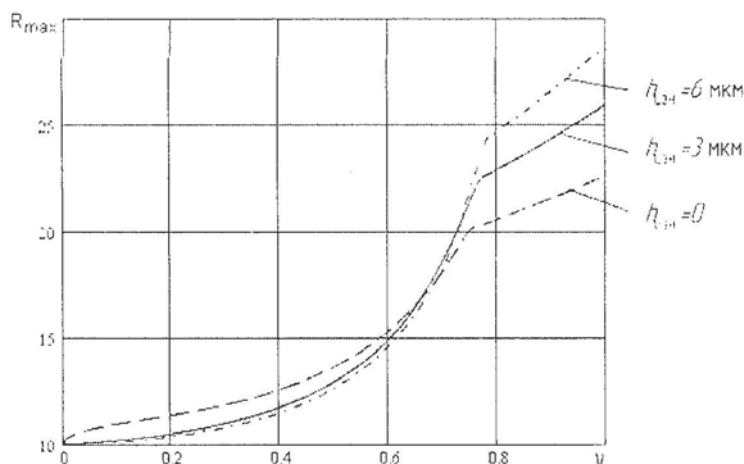


Рис. 9. Зависимость шероховатости обработанной поверхности  $R_{\text{max}}$  от геометрического параметра режущей кромки  $v$  при различных значениях ее износа  $h_{\text{изн}}$  ( $a_z = 10$  мкм,  $\beta = 25^\circ$ )

Из графика следует, что увеличение параметра  $v$  способствует увеличению шероховатости. Влияние линейного износа на шероховатость неоднозначно: для режущих кромок, характеризуемых значениями  $v < 0,7$ , износ ведет к уменьшению шероховатости; для режущих кромок, характеризуемых значениями  $v > 0,7$ , износ ведет к увеличению шероховатости.

Для объяснения такого влияния износа смоделируем режущие кромки с таким сочетанием геометрических параметров  $v$  и  $b$ , которые при заданной глубине внедрения  $a_z$  дают одинаковую шероховатость  $R_{\text{max}}$  (рис. 10).

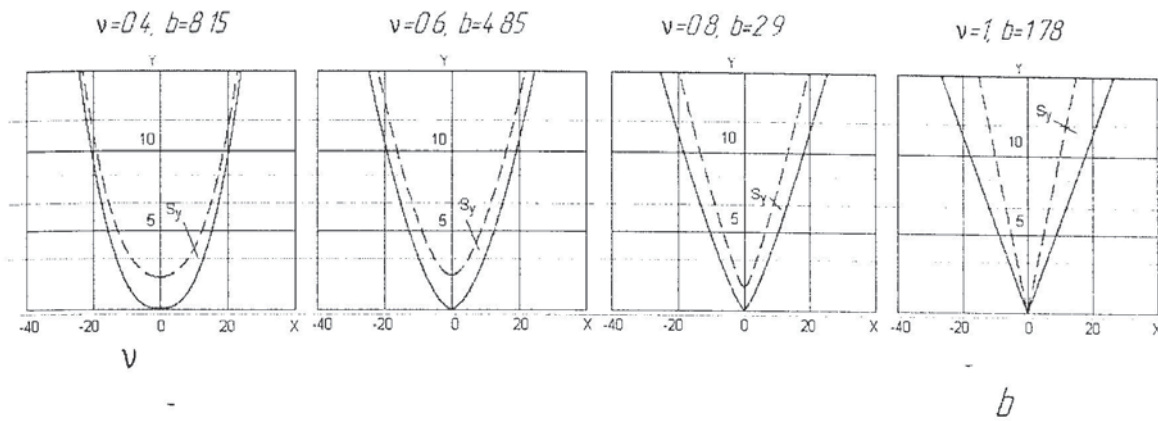


Рис. 10. Режущие кромки с различным сочетанием параметров  $v$  и  $b$ , дающих шероховатость  $R_{\max} = 15$  мкм ( $h_{\text{изн}} = 0$ ,  $a_z = 10$  мкм,  $\beta = 25^\circ$ )

На рис. 10 видно, что у режущих кромок, характеризуемых значениями  $v < 0,7$ , площадь выдавливаемого материала  $S_y$  распределена преимущественно у вершины режущей кромки, поэтому ее износ при постоянной глубине внедрения  $a_z$  приведет уменьшению шероховатости  $R_{\max}$ . У режущих кромок, характеризуемых значениями  $v > 0,7$ , наоборот, площадь  $S_y$  сосредоточена преимущественно в верхней части режущей кромки, поэтому ее износ при постоянной глубине внедрения  $a_z$  приводит к увеличению шероховатости  $R_{\max}$  (рис. 11).

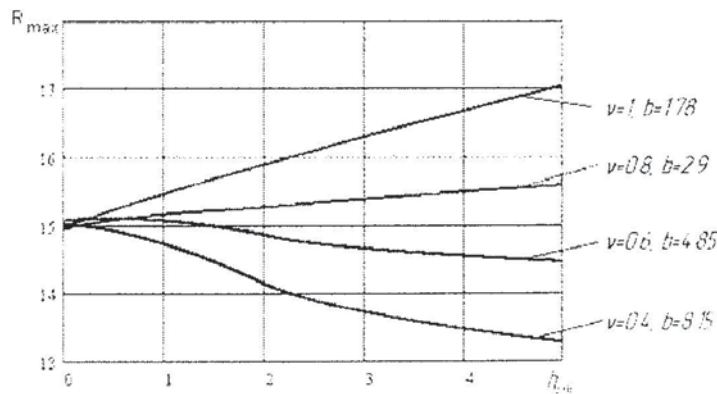


Рис. 11. Зависимость шероховатости обработанной поверхности  $R_{\max}$  от износа режущей кромки зерна  $h_{\text{изн}}$  ( $a_z = 10$  мкм,  $\beta = 25^\circ$ )

Далее определим степень влияния параметров  $b$ ,  $v$ ,  $h_{\text{изн}}$ ,  $a_z$ ,  $\beta$  на функцию  $R_{\max}(b, v, h_{\text{изн}}, a_z, \beta)$ .

1. Сравним влияние параметров  $v$  и  $b$ .

На рис. 12 видно, что функция  $D(v, b) > 1$  для всех рассматриваемых режущих кромок. Следовательно, влияние параметра  $v$  на шероховатость шлифованной поверхности значительно сильнее влияния параметра  $b$ .

2. Оценим влияние параметра  $a_z$  на шероховатость.

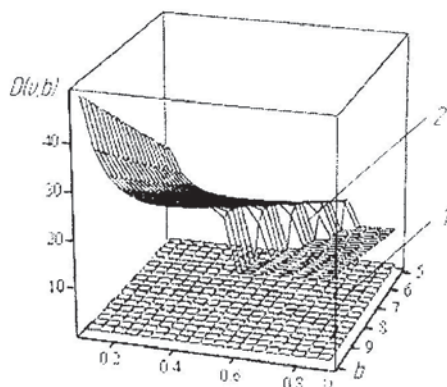


Рис. 12. Сравнение значений функций  $D(v, b)$  и  $D_{\text{ном}} = 1$  ( $a_z = 10$  мкм,  $\beta = 25^\circ$ ,  $h_{\text{изн}} = 0$ ): 1 — график функции  $D_{\text{ном}} = 1$ ; 2 — график функции  $D(v, b)$

Построение графика функции  $D(v, a_z)$  показало, что он лежит выше номинальной поверхности  $D_{\text{ном}} = 1$  для всех рассматриваемых режущих кромок. Следовательно, влияние параметра  $v$  на шероховатость шлифованной поверхности значительно сильнее влияния параметра  $a_z$ .

Построение графика функции  $D(b, a_z)$  позволило сделать вывод о том, что относительное влияние параметров  $b$  и  $a_z$  на шероховатость непостоянно и зависит от геометрии режущих кромок (рис. 13).

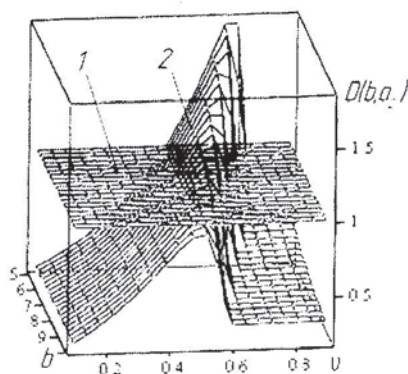


Рис. 13. Сравнение значений функций  $D(b, a_z)$  и  $D_{\text{ном}} = 1$  ( $a_z = 10$  мкм,  $\beta = 25^\circ$ ,  $h_{\text{изн}} = 0$ ): 1 — график функции  $D_{\text{ном}} = 1$ ; 2 — график функции  $D(b, a_z)$

Для режущих кромок с геометрией, характеризуемой значениями  $v \in [0,5; 0,7]$  функция  $D(b, a_z) > 1$ , т.е. в этих случаях влияние параметра  $b$  на шероховатость сильнее. Для остальных режущих кромок наблюдается обратная зависимость.

3. Оценим влияние параметра  $\beta$  на шероховатость.

Построение графика функции  $D(\beta, v)$  показало, что он лежит ниже номинальной поверхности  $D_{\text{ном}} = 1$  для всех рассматриваемых режущих кромок. Следовательно, влияние параметра  $v$  на шероховатость шлифованной поверхности сильнее влияния параметра  $\beta$ .



Построение графика функции  $D(\beta, b)$  позволило сделать вывод о том, что относительное влияние параметров  $\beta$  и  $b$  на шероховатость непостоянно и зависит от геометрии режущих кромок: для режущих кромок с геометрией, характеризуемой большими значениями  $v$ , функция  $D(\beta, b) = 0$  (рис. 14).

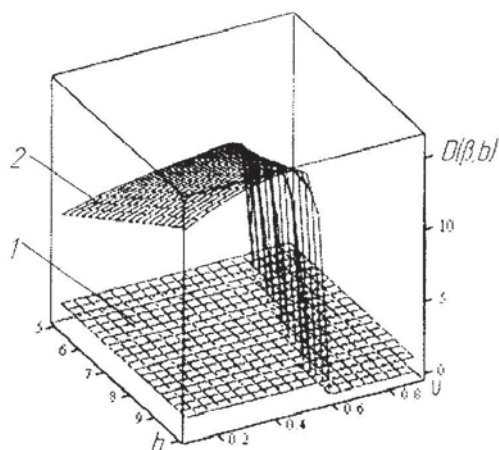


Рис. 14 Сравнение значений функций  $D(\beta, b)$  и  $D_{\text{ном}} = 1$  ( $a_z = 10$  мкм,  $\beta = 25^\circ$ ,  $h_{\text{изн}} = 0$ ): 1 — график функции  $D_{\text{ном}} = 1$ ; 2 — график функции  $D(\beta, b)$

Полученный результат можно объяснить тем, что данные режущие кромки только деформируют обрабатываемый материал. Изменение параметра  $\beta$  на малую величину никак не отразится на их режущей способности, т. е.  $R'_{\text{max}}(\beta) = 0$ . Для остальных режущих кромок  $D(\beta, b) > 1$ , т. е. изменение параметра  $\beta$  сильнее повлияет на шероховатость, чем изменение параметра  $b$ .

Закономерность, подобная изображенной на рис. 14, наблюдается и при построении графика функции  $D(\beta, a_z)$ : для режущих кромок с геометрией, характеризуемой большими значениями  $v$  функция  $D(\beta, a_z) = 0$ . Для остальных режущих кромок  $D(\beta, a_z) > 1$ , т. е. изменение параметра  $\beta$  сильнее повлияет на шероховатость, чем изменение параметра  $a_z$ .

4. Сравним влияние параметров  $h_{\text{изн}}$  и  $b$  на шероховатость.

Построение графика функции  $D(h_{\text{изн}}, b)$  показало, что он лежит ниже номинальной поверхности  $D_{\text{ном}} = 1$  для всех рассматриваемых режущих кромок. Следовательно, для рассматриваемых режущих кромок параметр  $h_{\text{изн}}$  слабее влияет на шероховатость, чем параметр  $b$ .

## Выводы

1. Выбранная математическая модель режущей кромки и разработанная математическая модель образования единичной шлифовочной риски более точно отражают реальный процесс микрорезания: учитывается как собственно резание, так и упруго-пластическая деформация, а также износ режущей кромки.

2. Установлено, что увеличение геометрических параметров режущей кромки  $v$  и  $b$ , глубины ее внедрения в обрабатываемый материал  $a_z$ , мгновенного угла сдвига  $v$  увеличивают шероховатость шлифованной поверхности. Влияние линейного износа  $h_{\text{изн}}$  зависит от значений геометрического параметра  $v$ . Износ режущих кромок,

характеризуемых значениями  $v < 0,7$ , способствует уменьшению шероховатости, а износ режущих кромок, характеризуемых значениями  $v > 0,7$ , способствует увеличению шероховатости обработанной поверхности.

3. Установлено, что в наибольшей степени на шероховатость  $R_{\max}$  влияет изменение параметра  $v$ . Несколько слабее влияние мгновенного угла сдвига  $\beta$ . Еще слабее влияние параметров  $b$  и  $a_z$ . Наиболее слабо повлияет на шероховатость изменение параметра  $h_{\text{изн}}$ .

Кроме того, на основе полученных выводов можно сформулировать следующие практические рекомендации по правке шлифовальных кругов.

1. Для шлифовальных кругов с режущими кромками, характеризуемыми значениями параметра  $v < 0,7$ , рекомендуется применять метод правки, который обеспечивает «в основном срезание и притупление вершин абразивных зерен» [2], поскольку данные вершины только упруго-пластически деформируют обрабатываемый материал (рис. 10). Согласно [2], таким методом правки является, например, правка абразивных кругов правящими кругами по методу шлифования. Минимальную глубину правки можно определить, используя формулы (3) и (4).

2. Для шлифовальных кругов с режущими кромками, характеризуемыми значениями параметра  $v > 0,7$ , рекомендуется применять метод правки, при котором происходит «главным образом скалывание и раздавливание абразивных зерен» [2], поскольку затупление этих зерен согласно приведенным выше исследованиям должно приводить к увеличению шероховатости обработанной поверхности (рис. 10). Согласно [2], таким методом правки является, например, правка абразивных кругов правящими кругами по методу обкатывания.

Рекомендациями 1 и 2 можно воспользоваться при известной геометрии режущих кромок зерен шлифовального круга (известных значениях параметров  $b$  и  $v$ ). Если предположить, что определенному абразивному материалу соответствует определенная форма режущих кромок зерен (известны средние значения параметров  $b$  и  $v$ ), то становится возможным рекомендовать для шлифовальных кругов на основе этого материала наиболее оптимальные методы правки.

3. Режимы шлифования рекомендуется назначать из условия  $a_z > y_{\text{мин}} - h_{\text{изн}}$ , для чего необходимо определить глубину внедрения режущей кромки  $a_z$  в обрабатываемый материал для различных схем и условий шлифования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н о с о в Н. В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей. Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. — Самара, 1997.
2. М а с л о в Е. Н. Теория шлифования материалов. — М.: Машиностроение, 1974. — 320 с.
3. Ф и л и м о н о в Л. Н. Высокоскоростное шлифование. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. — 248 с.
4. К о р ч а к С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. — М.: Машиностроение, 1974. — 280 с.
5. О с и п о в А. П. К вопросу расчета сил при резании единичным абразивным зерном. — «Вестник СамГТУ», № 24, серия «Технические науки», 2004. — С. 144—151.
6. Д е м к и н Н. Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей. — М.: Наука, 1970. — 227 с.