

С.А. СОШНИКОВ, Ф.В. НОВИКОВ  
(Харьковский политехнический институт)

## МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО РЕЛЬЕФА АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА И КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ АЛМАЗНОМ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОМ ШЛИФОВАНИИ

Многочисленными исследованиями работоспособности абразивного инструмента из сверхтвердых материалов установлено, что технологические и технико-экономические показатели шлифования зависят от состояния микрорельефа рабочей поверхности круга, адаптирующегося к конкретным условиям процесса. Поэтому выбор параметров механического режима обработки должен производиться с учетом их влияния на нагруженность режущего рельефа. Для оценки нагруженности может быть принята максимальная глубина внедрения обрабатываемого материала в рабочий слой круга, которая определяет размеры единичных срезов и возможность динамического контакта шлифуемого изделия со связкой инструмента. Установление функциональной зависимости этого критерия от параметров режима обработки позволит проектировать процесс высокопроизводительного шлифования таким образом, чтобы полный съем подаваемого в зону резания материала происходил на определенном уровне от наиболее выступающих зерен, чем обеспечивается требуемая работоспособность алмазно-абразивных кругов. Обычно для описания механизма износа круга и образования стабилизировавшегося рельефа рассматривают износ единичного зерна без учета его работы с другими зернами и вероятностного распределения действующих на них нагрузок. Кроме того, не принимается во внимание износ зерна до его объемного разрушения или выпадения из связки, хотя в действительности полный ресурс его работы определяется периодом истирания и поверхностного микроскалывания с образованием площадки износа. На основании принятых допущений построена модель рабочего рельефа абразивного инструмента с островершинными (неизношенными) зернами и получено аналитическое выражение важнейшей характеристики рельефа – относительной полноты профиля  $\varepsilon(y)$  [1]. Такой подход позволяет учитывать вероятностный характер распределения нагрузок между эффективными зернами в поверхностном слое круга и установить глубину максимального внедрения обрабатываемого материала в рабочий абразивный слой:

$$Y_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot H_{\max} \cdot V'_{\text{изд}}}{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot \text{tg} \alpha}}, \quad (1)$$

где  $H_{\max}$  - наибольшая высота выступания зерен над уровнем связки, мм;  
 $V'_{\text{изд}}$  - проекция скорости изделия на нормаль к поверхности инструмента, т.е. скорость внедрения обрабатываемого материала в абразивный рельеф, мм/с;

$k$  - поверхностная концентрация зерен, шт/мм<sup>2</sup>;  $\alpha$  - половинный угол при вершине модели зерна (конуса).

Дальнейшее развитие модели рельефа [2] связано с учетом дообъемного износа зерна. Исходя из этого, оцениваем размер диспергированной вершины величиной  $h_i$ , пропорциональной нагрузке на зерно, т.е. глубине его внедрения в обрабатываемый материал (рис. 1,а):

$$h_i = \eta(y'_0 - y'_i + h_i) \quad (2)$$

или

$$h_i = \frac{\eta}{1-\eta}(y'_0 - y'_i). \quad (3)$$

При этом 
$$h_{\max} = \Delta \text{ (при } y'_i = 0), \quad (4)$$

а  $h_{\min} = 0$  при  $y'_i = y'_0$ , где  $\eta$  - коэффициент, характеризующий степень износа зерна до его объемного разрушения по отношению к глубине микрорезания;  $y'_0$  - уровень полного профиля ( $\varepsilon(y'_0) = 0,95$ ) сглаженного рельефа, определяющей также наибольшую глубину микрорезания зернами, максимально выступающими над связкой инструмента, мм;  $\Delta$  - величина смещения в новой системе координат  $X'O'Y'$  относительно уровня наиболее выступающих и неизношенных вершин, и является ординатой в системе координат  $XOY$  (рис. 1,а).

На основании методики, предложенной в работе [2], получаем функцию относительной полноты сглаженного профиля:

$$\varepsilon(y'_i) = 1 - \exp\left[-\frac{k \cdot V_{кр} \cdot \operatorname{tg} \alpha}{H_{\max} \cdot V'_{изд}} \cdot \frac{1}{1-\eta} \cdot (y'_i)^3\right]. \quad (5)$$

Уровень полного профиля или полного съема обрабатываемого материала  $y'_0$  (он же определяет нижнюю границу сглаживания рельефа) найдем из условия  $\varepsilon(y'_0) = 0,95$  [1]:

$$y'_0 = y_0 \cdot \sqrt[3]{1-\eta}. \quad (6)$$

График функции  $\varepsilon(y')$  (рис. 1,б) по отношению к  $\varepsilon(y)$  является более крутым ввиду уменьшения размеров  $h_i(y'_i)$  диспергированных вершин по глубине рабочего слоя.

Поскольку согласно выражению (6) при  $0 < \eta < 1$  имеем  $y'_0 < y_0$ , то, следовательно, приработка рельефа, характеризующаяся появлением площадок дообъемного износа на режущих зернах, способствует уменьшению глубины внедрения обрабатываемого материала в рабочий слой круга, что, в свою очередь, снижает нагрузку на режущие элементы вследствие уменьшения размеров единичных срезков. В этом и проявляется адаптация рельефа к конкретным условиям процесса, которая благоприятно сказывается на износостойкости инструмента, но приводит к росту энергоемкости процесса при одновременном снижении шероховатости обработанной поверхности.

Подстановкой в формулу (1) выражения (для круглого наружного шлифования):

$$V'_{изд} = 2 \cdot V_{изд} \cdot \sqrt{\frac{D_{изд} + D_{кр}}{D_{изд} \cdot D_{кр}}} \cdot t \quad (7)$$

получаем

$$y_{изд} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot H_{макс} \cdot V_{изд}}{k \cdot tg \alpha \cdot V_{кр}}} \cdot \sqrt[6]{\frac{D_{изд} + D_{кр}}{D_{изд} \cdot D_{кр}}} \cdot t, \quad (8)$$

где  $D_{изд}$ ,  $D_{кр}$  – диаметры изделия и круга формы 1A1 при круглом наружном шлифовании, мм;  $t$  – глубина шлифования, мм.

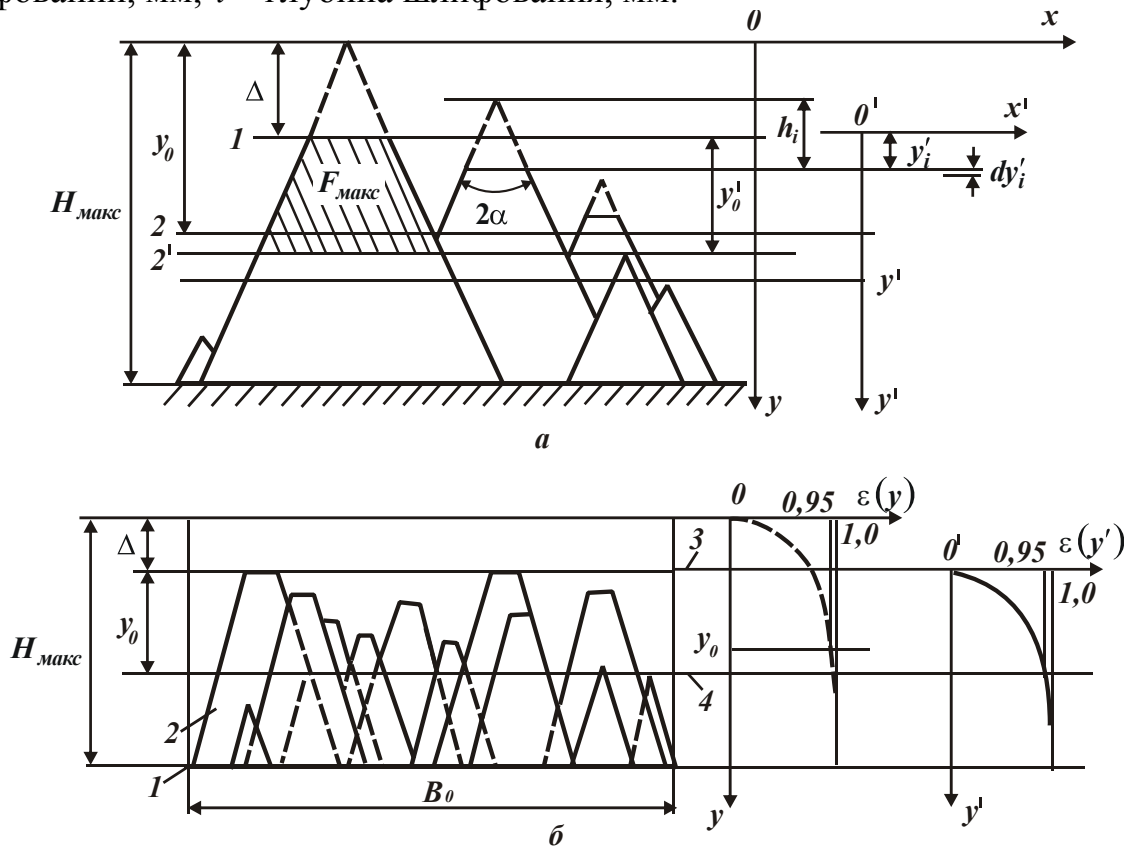


Рис. 1. Расчетная схема для определения функции относительной полноты профиля (а) и модель рабочего рельефа алмазно-абразивного инструмента с площадками дообъемного износа на эффективных зернах (б):

- а) 1 – верхний уровень сглаживания рельефа; 2 – уровень полного профиля для островершинного рельефа инструмента; 3 – уровень полного профиля сглаженного (стабилизировавшегося) рельефа;
- б) 1 – связка круга; 2 – зерна круга; 3 – верхний уровень сглаживания рельефа; 4 – уровень полного профиля или полного съема материала, а также нижняя граница сглаживания абразивного рельефа.

Величина  $y$  представляет собой наибольшую глубину проникновения в абразивный рельеф обрабатываемого материала, подаваемого в зону резания в форме выступов, образованных проходом предшествующих зерен. При этом образование среза происходит боковыми кромками зерна. Его толщина определяется вероятностной величиной взаимного смещения  $x$  (рис. 2):

$$0 \leq x \leq y_0 \cdot tg \alpha. \quad (9)$$

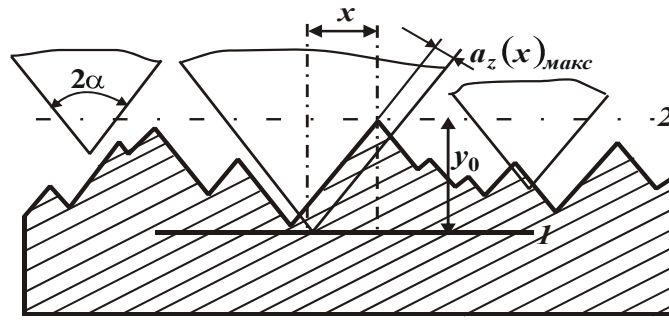


Рис. 2. Схема встречи зерен круга с неровностями на поверхности контакта, возникшими как результат прохода предыдущих абразивных зерен: 1 – уровень вершин зерен, максимально выступающих над связкой абразивного инструмента; 2 – уровень полного профиля или полного съема обрабатываемого материал, определяющий наибольшую глубину проникновения материала в рельеф, т.е. наибольшую глубину микрорезания.

Толщина единичного среза от наиболее выступающих зерен, как один из главных показателей работоспособности инструмента в конкретных условиях процесса шлифования, находится по зависимости

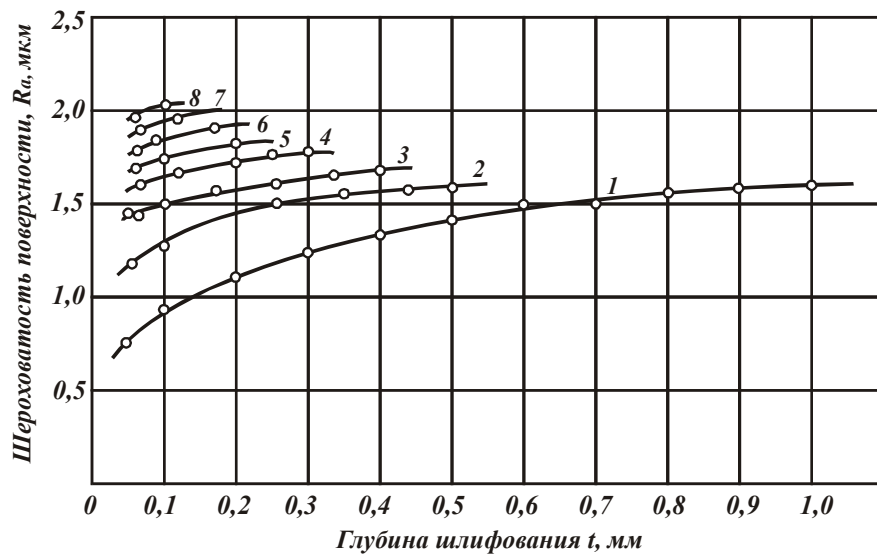
$$a_z(x)_{\text{макс}} = (y_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha - x) \cdot \cos \alpha. \quad (10)$$

Принимая во внимание равновероятное значение  $x$ , в последующих расчетах толщины среза следует исходить из усредненной (средневероятностной) величины  $\bar{x} = 0,5 \cdot y_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha$ . Тогда средневероятностная толщина среза от наиболее выступающих зерен определится как

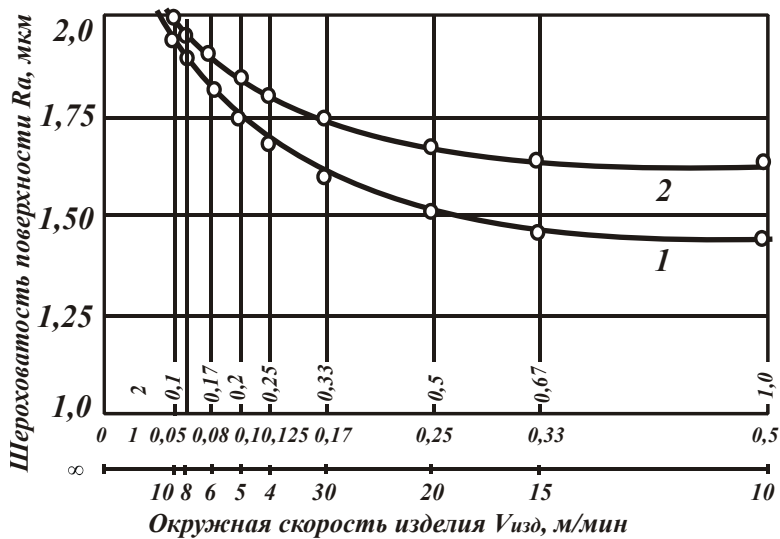
$$\bar{a}_{z,\text{макс}} = 0,5 \cdot y_0 \cdot \sin \alpha. \quad (11)$$

Анализ выражения (11) с учетом зависимости (8) позволяет заключить, что с целью уменьшения износа круга при условии его прямой зависимости от толщины единичных срезов целесообразнее увеличивать глубину шлифования, а не скорость изделия, т.е. схема глубинного шлифования при прочих равных условиях (в том числе и при  $V_{\text{изд}} \cdot t = \text{const}$ ) предпочтительней схемы многопроходного съема припуска с большими  $V_{\text{изд}}$  и малыми  $t$ . Подтверждением этому являются экспериментальные результаты [3]. Поскольку функция  $y_0$  характеризует также и шероховатость обработанной поверхности, то, как следует из формулы (8), влияние глубины резания на высоту остаточных микронеровностей незначительно, что подтверждено экспериментально при круглом шлифовании (рис. 3,а) и согласуется с ранее полученными выводами [4, 5]. Ввиду этого схема глубинного съема припуска (и особенно при высокопроизводительном процессе) представляется совершеннее и для достижения низкой шероховатости обработанной поверхности (рис. 3,б).

Сопоставив выражения (4), (6), (8) и (11), можно заключить, что глубинное шлифование по отношению к равнопроизводительной обработке по многопроходной схеме съема припуска характеризуется меньшей величиной износа  $\Delta$ , т.е. меньшей степенью сглаженности абразивного рельефа (большей его развитостью) при меньших толщинах образующихся срезов, что немаловажно в условиях высокопроизводительного процесса с точки зрения его энергоемкости и теплонапряженности.



а



б

Рис. 3. Шероховатость обработанной поверхности при врезном круглом шлифовании: круг 1А1 300х25 АС6 200/160 А1 – 100% МВ1 ( $V_{кр} = 35$  м/с; обрабатываемый материал – ВК8): а – скорость изделия: 1 – 6 соответственно 1 – 6 м/мин, 7 – 8 м/мин, 8 – 10 м/мин; б – производительность шлифования: 1 –  $Q_{уд} = 500$  мм<sup>3</sup>/(мин·мм);  $Q_{рез} = 12,5 \cdot 10^3$  мм<sup>3</sup>/мин; 2 –  $Q_{уд} = 1000$  мм<sup>3</sup>/(мин·мм);  $Q_{рез} = 25 \cdot 10^3$  мм<sup>3</sup>/мин

Если уменьшение сглаженности рельефа (уменьшение размеров площадок износа на зернах) приводит к снижению энергоемкости и теплонапряженности процесса, то уменьшение толщин единичных срезов вызывает обратный эффект. Поэтому суммарный эффект в зависимости от конкретных условий шлифования может быть различным, то экспериментально установлено, что переход на глубинное шлифование сопровождается увеличением энергоемкости процесса.

Поэтому актуальным становится исследование влияния повышенной теплонапряженности процесса на состояние поверхностного слоя обрабатываемого изделия (таблица). Из полученных данных можно заключить, что в условиях высокопроизводительного алмазного шлифования сплава WC-C<sub>о</sub> по глубинной

схеме обработки влияние теплового фактора несущественно, что говорит о преобладании в этом случае силового воздействия.

| Параметры кристаллической субструктуры и напряженного состояния поверхностного слоя твердого сплава ВК8 после алмазного высокопроизводительного глубинного шлифования |             |  |               |  |
|---|-------------|--|---------------|--|
| $V_{изд}$ ,<br>м/мин  | $t$ ,<br>мм | $\varepsilon = \Delta d / \Delta x \cdot 10^4$ | $L_3$ ,<br>нм | $(\sigma_1 + \sigma_2)$ ,<br>Гн/м <sup>2</sup> |
| 1,0   | 0,5         | 4  | 17,7          | 2,6  |
| 2,0   | 0,25        | 3  | 16,8          | 3,0  |
| 3,0   | 0,17        | 3  | 16,5          | 3,0  |
| 4,0   | 0,125       | 2  | 14,9          | 3,4  |
| 5,0   | 0,1         | 2  | 15,2          | 3,2  |
| 6,0   | 0,08        | 2  | 15,6          | 3,2  |
| 8,0   | 0,06        | 3  | 16,2          | 3,0  |
| 10,0  | 0,06        | 4  | 16,9          | 2,8  |

Примечание. Круг 1А1 300х25 АС6 200/160 А1 – 100% МВ1; скорость резания  $V_{кр} = 35$  м/с; продольная подача  $S_0 = 22,5$  мм/об; СОЖ – 3%-й содовый раствор в воде +0,5%-й раствор  $\text{NaNO}_3$ ; производительность шлифования  $Q_{yd} = 500$  мм<sup>3</sup>/(мин·мм);  $Q_{рез} = 11250$  мм<sup>3</sup>/мин.

Таким образом, благодаря аналитическому подходу к описанию установившегося рельефа шлифовального инструмента представляется возможным оценить выходные показатели процесса и прогнозировать перспективные направления повышения эффективности абразивных операций, в частности, увеличение работоспособности алмазных кругов в условиях круглого шлифования труднообрабатываемых материалов.

#### Пристатейный библиографический список

1. Раб А.Ф., Новиков Ф.В. Относительная полнота профиля рабочей поверхности круга из СТМ. – Резание и инструмент, 1980, вып. 24, с. 41-46.
2. Новиков Ф.В. Кинетика образования режущего рельефа алмазного круга в процессе шлифования. – В кн.: Контакт. процессы при больших пласт. Деформациях. Харьков, 1982, с. 37-43.
3. Каракулова М.Л. К вопросу о глубине внедрения абразивного зерна в металл при глубинном шлифовании. – В кн.: Совершенствование процессов обраб. материалов резанием. Ижевск, 1976, вып. 1, с. 43-46.
4. Аштаев В.Н. исследование процесса глубинного шлифования наружных поверхностей деталей машин: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Саратов, 1980, 20 с.
5. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов, 1975, 212 с.