

## ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

621.795.2+691.9.072

### УСЛОВИЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Канд. техн. наук, доц. И.П. НИКИФОРОВ

*Предложена формула, характеризующая начало стружкообразования при шлифовании. Определены наиболее значимые параметры, оказывающие влияние на минимальную толщину срезаемой стружки.*

*The formula describing the beginning of chip forming at grinding is offered. The most significant parameters influencing minimum width of the cut off shavings are determined.*

Вопрос о минимально возможной толщине  $a_z$  срезаемого слоя, который может быть снят единичным зерном, постоянно находится в зоне внимания исследователей, занимающихся проблемами абразивной обработки. Наиболее часто речь идет о соотношении  $\frac{a_z}{\rho}$ , которое характеризует начало стружкообразования. При превышении этой величины некоторого критического значения начинается снятие стружки.

Схема взаимодействия единичного зерна, имеющего радиус  $\rho$  закругления кромки, с обрабатываемой поверхностью изображена на рис. 1. Из рисунка ясно, что величина переднего угла  $\gamma'$  переменна и зависит от координаты  $a'$  рассматриваемой точки на передней поверхности зерна. Имеет место равенство:

$$\frac{a'}{\rho} = (1 + \sin \gamma'). \quad (1)$$

При некотором значении  $a' > a_z$  стружка будет сниматься. Если это условие не выполняется, то будет происходить деформация без отделения металла. Следовательно, необходимо определить такое значение переднего угла  $\gamma$ , которое является критическим при данных параметрах зерна и условиях обработки.

Составим идеализированную схему сил, действующих на передней поверхности инструмента (рис. 2). Передняя поверхность инструмента действует на срезаемый слой с нормальной силой  $N$ . По закону трения Амонтона нормальная сила создает силу трения  $F = \mu_1 N$  (где  $\mu_1$  — коэффициент трения скольжения между стружкой и инструментом  $\mu_1 = \operatorname{tg} \xi$ ). Складывая силы  $N$  и  $F$ , получим силу стружкообразования  $R$ , наклоненную к поверхности резания под углом  $\Omega$ . Разложим силу стружкообразования на две: силу  $P_N$ , перпендикулярную к условной плоскости сдвига, характеризующуюся углом сдвига  $\beta_1$ , и силу  $P_T$ , действующую в плоскости сдвига. Сила  $P_N$  сжимает сдвигаемый слой, а сила  $P_T$  (сила сдвига), сдвигает его.

Для образования стружки необходимо, чтобы сила сдвига  $P_T$  была бы, во всяком случае, положительной. Для этого должно выполняться условие

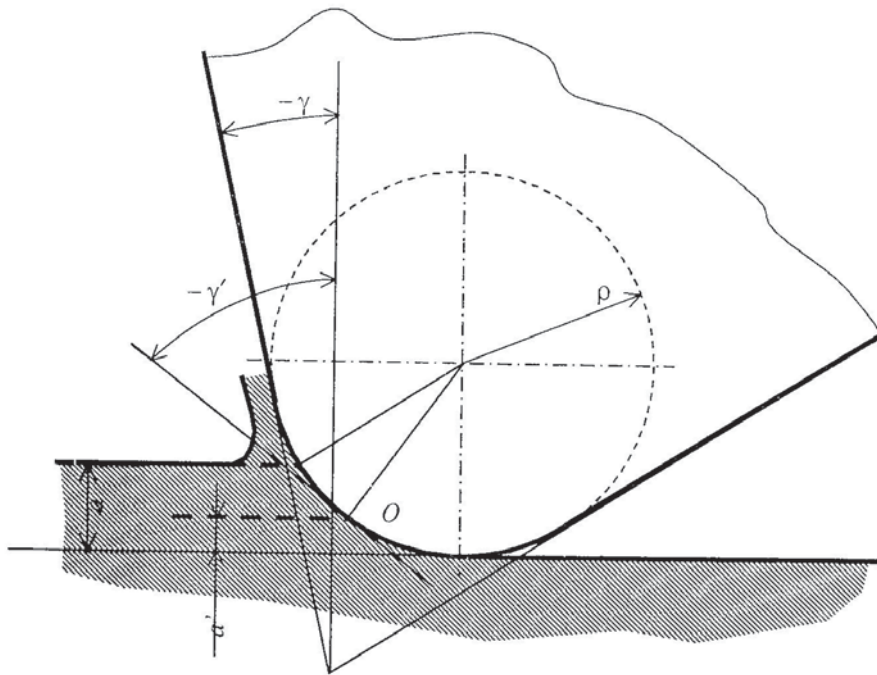


Рис. 1. Схема взаимодействия с обрабатываемой поверхностью абразивного зерна, имеющего закругление кромки

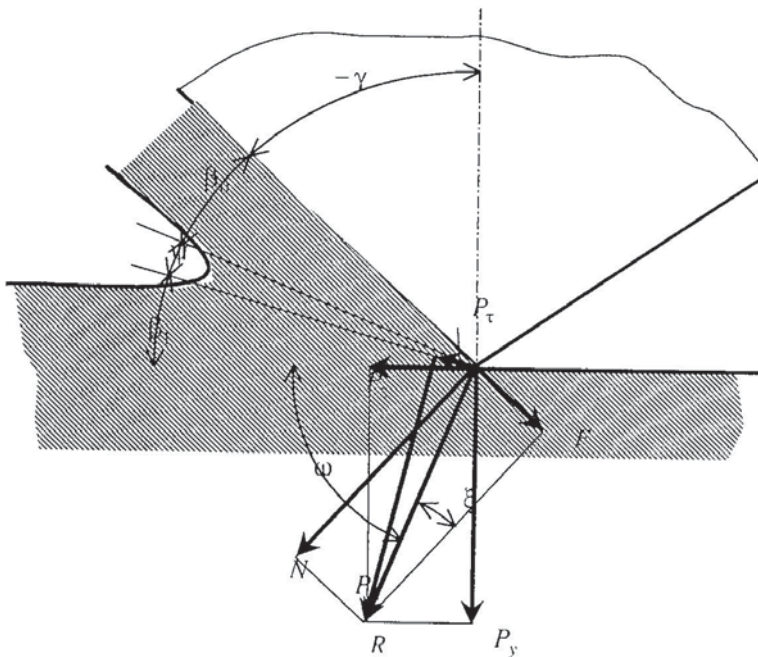


Рис. 2. Схема сил, действующих на передней поверхности инструмента

$$\beta_1 + \omega < \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

где  $\beta_1$  — угол сдвига (рис. 2).

Поскольку  $\omega = \xi - \gamma$  ( $\xi$  — угол трения между стружкой и инструментом, рис. 2) и

$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\eta - \sin \gamma}$  [1] ( $\eta$  — коэффициент усадки стружки), то неравенство (2) примет вид

$$\frac{\cos \gamma}{\eta - \sin \gamma} < \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} - (\xi - \gamma) \right). \quad (3)$$

Учитывая, что  $\operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \operatorname{ctg} \alpha$ , после преобразования получим

$$\operatorname{tg}(\xi - \gamma) < \frac{\eta - \sin \gamma}{\cos \gamma}. \quad (4)$$

На неравенство (4) накладывается следующее условие:  $(\xi - \gamma) \in \left( -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right)$ . Оно выполняется фактически для всего диапазона возможных значений передних углов и углов трения, наблюдаемых при шлифовании.

Выражение (4) преобразуется к следующему виду:

$$\frac{\eta}{\mu_1} \cos \gamma + \eta \sin \gamma > 1 \quad (5)$$

и приводится к квадратному уравнению

$$\eta^2 (1 + \mu_1^2) \sin^2 \gamma - 2\mu_1^2 \eta \sin \gamma + (\mu_1^2 - \eta^2) > 0, \quad (6)$$

корень которого, лежащий в диапазоне  $-1 \leq \sin \gamma \leq 1$ , находим по формуле

$$\sin \gamma > \frac{1}{1 + \mu_1^2} \left( \frac{\mu_1^2}{\eta} - \sqrt{1 + \mu_1^2 - \frac{\mu_1^2}{\eta^2}} \right). \quad (7)$$

На рис. 3 показано значение минимального переднего угла  $\gamma$ , при котором возможно образование стружки, в зависимости от коэффициента трения  $\mu_1$  между стружкой и обрабатываемой поверхностью и коэффициента  $\eta$  усадки стружки. Из графиков видно, что условие начала стружкообразования в значительной степени зависит от коэффициента трения и в меньшей степени от коэффициента усадки стружки. Влияние последнего наиболее ощутимо при высоких коэффициентах трения, т.е., например, когда обработка проводится при низких скоростях резания.

С учетом (7) выражение, характеризующее начало стружкообразования, примет вид

$$\frac{a_z}{\rho} > 1 + \frac{1}{1 + \mu_1^2} \left( \frac{\mu_1^2}{\eta} - \sqrt{1 + \mu_1^2 - \frac{\mu_1^2}{\eta^2}} \right). \quad (8)$$

Формулу (8) можно усовершенствовать, если учесть коэффициент трения  $\mu_2$  — между частицами материала в направлении максимальных касательных напряжений (коэффициент внутреннего трения). Проф. Кравченко Б.А. [2] в своих исследованиях показал, что угол внутреннего трения равен по величине углу текстуры  $\psi$  (рис. 2). Если проекцию вектора  $R$  выполнить не на плоскость сдвига, а на плоскость текстуры, то выражение (4) примет вид

$$\operatorname{tg}(\xi + \psi - \gamma) < \frac{\eta - \sin \gamma}{\cos \gamma}. \quad (9)$$

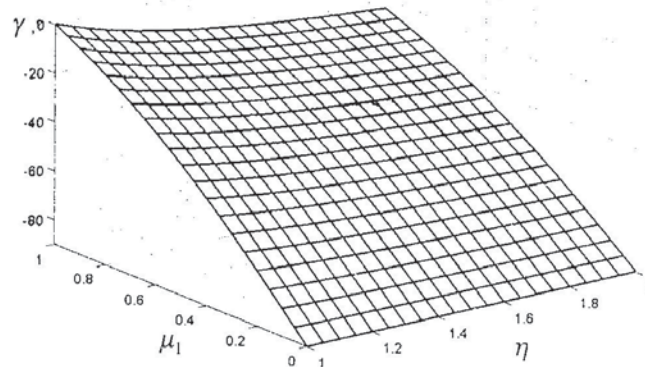


Рис. 3. Зависимость минимального переднего угла от коэффициента внешнего трения и коэффициента усадки стружки

Поскольку  $\operatorname{tg}(\xi + \psi) = \frac{\operatorname{tg}\xi + \operatorname{tg}\psi}{1 - \operatorname{tg}\xi \operatorname{tg}\psi}$ , то обобщенный коэффициент трения будет определяться следующим образом:

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{1 - \mu_1 \mu_2}. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что внешнее и внутреннее трение в равной степени влияет на условие начала стружкообразования. Их значения могут колебаться в широком диапазоне. Так например, коэффициент внешнего трения в условиях высокоскоростного микрорезания изменяется от  $0,03 \div 0,15$ , при контакте алмазного зерна с твердой сталью и чугуном, до  $0,4 \div 0,8$  – при контакте электрокорунда со сплавами на основе титана, кобальта и т.п. По данным большинства исследователей увеличение скорости резания при шлифовании приводит к уменьшению коэффициента трения. Увеличение скорости микрорезания, Стали 45 электрокорундовым зерном с передним углом  $\gamma = -85^\circ$ , с 20 до 80 м/с привело к уменьшению значения  $\mu_1$  с 0,44 до 0,19. При скольжении алмазным наконечником по Стали 45 повышение скорости с 10 до 25 м/с уменьшило коэффициент трения с 0,15 до 0,07 [3].

Значение угла текстуры можно определить по формуле [1]:

$$\operatorname{ctg}\psi = \frac{1}{2}(\Delta + \sqrt{\Delta^2 + 4}), \quad (11)$$

где  $\Delta = \operatorname{ctg}\beta_1 + \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma)$  — относительный сдвиг при превращении срезаемого слоя в стружку.

По данным различных исследователей значение коэффициента усадки стружки  $\eta$  при шлифовании колеблется в пределах от 1,1 до 1,8 [3]. Меньшие значения усадки соответствуют большей скорости резания. В формуле (8) коэффициент  $\mu_1$  фигурирует только во второй степени, поэтому рационально ввести обозначение  $T = \mu_1^2$ . Кроме того, необходимо учесть, что если минимальный передний угол, соответствующий возможности стружкообразования, окажется больше переднего угла  $\gamma$ , обусловленного геометрией абразивного зерна, то снятие стружки происходить не будет. При этом зерно будет только деформировать металл. Учитывая сказанное выше, можно записать следующую систему уравнений, определяющих условие стружкообразования:

$$\begin{cases} \frac{a_z}{\rho} > 1 + \sin \gamma_{\min} \\ \gamma_{\min} < \gamma \end{cases} \quad (12)$$

где  $\sin \gamma_{\min} = \frac{1}{1+T} \left( \frac{T}{\eta} - \sqrt{1+T - \frac{T}{\eta^2}} \right)$ ;  $T = \left( \frac{\mu_1 + \mu_2}{1 - \mu_1 \mu_2} \right)^2$ ;  $\eta$  — коэффициент усадки стружки;

$\mu_1$  — коэффициент внешнего трения между стружкой и инструментом;  $\mu_2$  — коэффициент внутреннего трения между частицами снимаемого материала.

На рис.4 показана зависимость соотношения  $\frac{a_z}{\rho}$  от коэффициента внешнего трения  $\mu_1$  при различных значениях коэффициента  $\eta$  усадки стружки (без учета внутреннего трения).

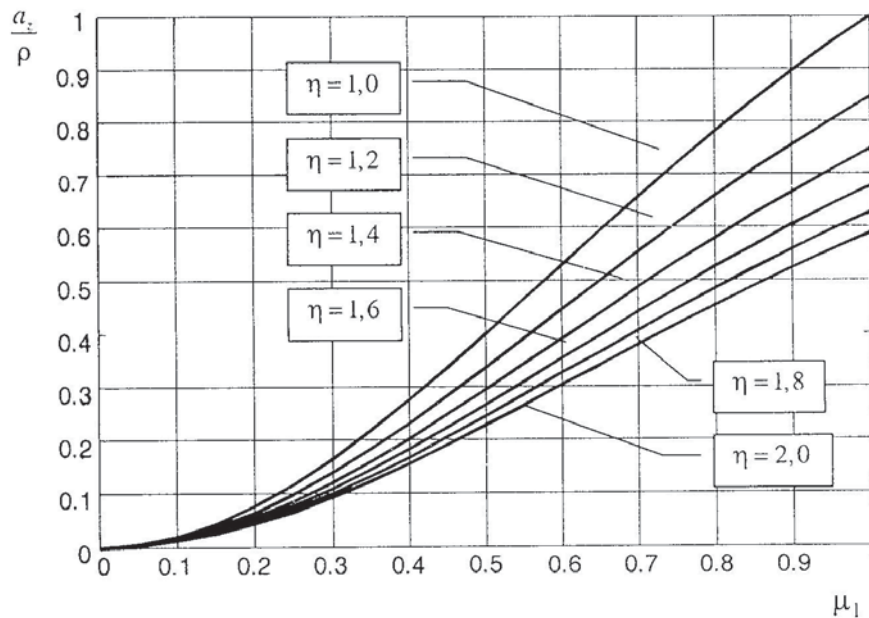


Рис. 4. Зависимость соотношения  $\frac{a_z}{\rho}$  от коэффициента внешнего трения при различных значениях коэффициента усадки стружки

Значения величины  $\frac{a_z}{\rho}$ , определенные с учётом коэффициентов как внешнего, так и внутреннего трения, вполне удовлетворительно согласуются с результатами экспериментальных исследований. Данные опытов [3] для различных условий обработки (обрабатываемый материал – Сталь 45, HRC =48÷52; материал инструмента – электрокорунд 24А) и значения, рассчитанные по формулам (11) и (12), приведены в таблице.

Итак, получены выражения (12), характеризующие начало стружкообразования. Значение минимально возможной толщины стружки, которая может быть снята единичным зерном, зависит, главным образом, от: а) радиуса закругления режущей кромки б) трения скольжения — между стружкой и инструментом; б) внутреннего трения — между частицами материала в направлении максимальных касательных напряжений; в) усадки стружки (влияние усиливается по мере уменьшения скорости резания).

Таблица

Экспериментальные [3] и расчетные данные по величине  $a_z/\rho$ 

| Скорость<br>резания,<br>м/с | $\gamma, ^\circ$ | $\beta_1, ^\circ$ | $\mu_1$ | $\eta$ | Расчеты        |         | Соотношение $a_z/\rho$ |              |
|-----------------------------|------------------|-------------------|---------|--------|----------------|---------|------------------------|--------------|
|                             |                  |                   |         |        | $\psi, ^\circ$ | $\mu_2$ | Экспери-<br>мент       | Рас-<br>четы |
| 20                          | -47              | 16                | 0,4     | 1,6    | 10             | 0,18    | 0,36                   | 0,36         |
| 40                          | -50              | 15                | 0,3     | 1,6    | 9              | 0,17    | 0,24                   | 0,26         |
| 80                          | -57              | 13                | 0,2     | 1,5    | 8              | 0,14    | 0,16                   | 0,15         |
| 120                         | -60              | 12                | 0,15    | 1,5    | 7              | 0,13    | 0,07                   | 0,10         |
| 160                         | -66              | 10                | 0,1     | 1,4    | 6              | 0,10    | 0,03                   | 0,05         |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б о б р о в В. Ф. Основы теории резания металлов. — М.: Машиностроение, 1975. — 344 с.
2. К р а в ч е н к о Б. А. Стружка — источник информации о предыстории процесса резания // Вестник СамГТУ. — Сер. «Технические науки». — 2000. — №10. — С. 118—121.
3. Ф и л и м о н о в Л. Н. Высокоскоростное шлифование. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. — 248 с.