

МЕТАЛЛУРГИЯ, МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАТЕРИАЛООБРАБОТКА

УДК 621.91.01

И. П. Никифоров, П. Н. Мальцев

РОЛЬ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ МИКРОРЕЗАНИЯ АБРАЗИВНЫМ ЗЕРНОМ

Приведены критерии, необходимые для образования стружки при микрорезании абразивным зерном. Аналитическим путем получены выражения для определения параметра стружкообразования. Показана роль внешнего и внутреннего трения в процессе фрикционного взаимодействия абразивного зерна с поверхностью заготовки.

Ключевые слова: абразивное зерно, внешнее трение, внутреннее трение, передний угол, параметр стружкообразования, усадка стружки, режущая кромка.

Процесс микрорезания абразивным зерном — сложное трибологическое явление. Отделение материала в виде стружки от поверхности заготовки сопровождается упругим и пластическим деформированием поверхностей, выделением тепла и диспергированием. Отличительной особенностью шлифования и других видов абразивной обработки является то, что в данном случае съем стружки преимущественно происходит при отрицательных передних углах.

К геометрическим параметрам снимаемого слоя, характеризующим процесс резания, можно отнести: толщину и ширину среза, а также усадку стружки. В ряде современных научных работ и в учебниках по резанию материалов можно встретить замечания, что на процесс деформации при резании, которая характеризуется коэффициентом усадки стружки, оказывают влияние физико-механические характеристики обрабатываемого материала, величина подачи, глубина резания и другие параметры.

Еще в середине прошлого века Розенберг А. М. и Насонов К. А. (Розенберг, Насонов, 1957) отмечали, что при анализе механики резания имеет место ошибочное физическое толкование явлений и некорректное определение первостепенности влияющих факторов. Авторы показали, что важнейшая и однозначная роль в степени пластической деформации принадлежит коэффициенту трения. Влияние режимов резания и физико-механических свойств обрабатываемых материалов на степень пластической деформации срезаемого слоя, определяемой усадкой стружки, может проявиться лишь через соответствующее их влияние на изменение коэффициента трения стружки по передней поверхности режущего инструмента.

Наши исследования полностью подтверждают вышесказанное. В развитие этих положений следует заметить, что локальное значение коэффициента трения в пределах зоны контакта «инструмент–стружка» не является постоян-

ным. И в зависимости от поставленных целей исследований можно рассматривать лишь незначительные, наиболее важные, зоны контакта абразивного зерна со стружкой. Так, если речь идет об образовании стружки, то первостепенная роль принадлежит линии раздела передней и задней поверхностей зерна — режущей кромке.

Известно, что вдоль линии режущей кромки нормальные напряжения достигают максимальных значений, а касательные напряжения равны нулю (т. е. силы трения отсутствуют). Поэтому при анализе фрикционного взаимодействия и оценке роли трения в зоне образования ювенильных поверхностей необходимо рассматривать локальную зону, расположенную в окрестности линии режущей кромки в направлении передней поверхности абразивного зерна, что также замечено в работе Крагельского И. В. (Крагельский, 1962).

В статье (Никифоров, 2006) установлены критерии, при которых упругая деформация может переходить в деформацию сдвига — происходит образование и отделение стружки. Для протекания деформации сдвига обобщенный коэффициент трения $\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{1 - \mu_1 \mu_2}$ не должен превышать некоторого значения,

определяемого из следующего неравенства:

$$\frac{1}{\mu} \cos \gamma + \sin \gamma - \frac{1}{\eta} > 0, \quad (1)$$

где μ_1 — коэффициент внешнего трения между стружкой и передней поверхностью абразивного зерна в окрестности линии режущей кромки; μ_2 — коэффициент внутреннего трения; η — коэффициент усадки стружки; γ — отрицательный передний угол на поверхности абразивного зерна в главной секущей плоскости на уровне плоскости заготовки.

После преобразования выражение (1) будет иметь вид:

$$\frac{\mu_1 + \mu_2}{1 - \mu_1 \mu_2} < \frac{\eta \cos \gamma}{1 - \eta \sin \gamma}. \quad (2)$$

Наши исследования показали (Никифоров, Мальцев, 2011), что гиперболоид вращения является наиболее удачной фигурой при моделировании геометрии абразивных зерен. Тогда величина переднего угла γ на поверхности абразивного зерна в главной секущей плоскости на уровне плоскости заготовки может быть определена из следующего выражения (Никифоров, 2009):

$$\frac{1}{\cos \gamma} = \mp \sqrt{\frac{\rho^2}{a_z (2\rho + a_z \times \operatorname{tg}^2 \gamma_3)} + \operatorname{tg}^2 \gamma_3 + 1}, \quad (3)$$

где ρ — радиус вершины гиперболы; a_z — установленная глубина резания; γ_3 — передний угол абразивного зерна, определяемый положением асимптот гиперболы – модели сечения зерна ($\gamma_3 = \frac{\varepsilon}{2}$, ε — угол между асимптотами).

Преобразуем выражение (2), исходя из того, что $\frac{1}{\cos \gamma} = \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1}$:

$$\pm \operatorname{tg}^2 \gamma + 1 = \mp \sqrt{\frac{\rho^2}{a_z (2\rho + a_z \times \operatorname{tg}^2 \gamma_3)} + \operatorname{tg}^2 \gamma_3 + 1},$$

$$\operatorname{tg}^2 \gamma = \frac{\rho^2 + 2\rho a_z \operatorname{tg}^2 \gamma_3 + a_z^2 \operatorname{tg}^4 \gamma_3}{a_z (2\rho + a_z \times \operatorname{tg}^2 \gamma_3)} \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}^2 \gamma = \frac{(\rho + a_z \operatorname{tg}^2 \gamma_3)^2}{a_z (2\rho + a_z \times \operatorname{tg}^2 \gamma_3)}, \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{\rho + a_z \operatorname{tg}^2 \gamma_3}{\sqrt{a_z (2\rho + a_z \times \operatorname{tg}^2 \gamma_3)}},$$

$$\gamma = -\operatorname{arctg} \left(\frac{\rho + a_z \operatorname{tg}^2 \gamma_3}{\sqrt{a_z (2\rho + a_z \times \operatorname{tg}^2 \gamma_3)}} \right), \quad \text{где } \gamma \in \left(-\frac{\pi}{2}; 0 \right) \quad (5)$$

Подставив выражение (5) в неравенство (2) получаем возможность, в зависимости от установленной глубины резания a_z и геометрии зерна, определить максимально возможное значение обобщенного коэффициента трения, при котором возможна деформация сдвига.

Общепринятым критерием, характеризующим отсутствие или наличие стружкообразования в процессе фрикционного взаимодействия абразивного зерна со стружкой, является отношение $\frac{a_z}{\rho}$ — параметр стружкообразования, значение которого в разных работах изменяется в довольно широком диапазоне — от 0,01 до 1,0. Формулы для нахождения этой величины в литературных источниках отсутствуют, а приведенные данные являются, как правило, результатами экспериментальных исследований. Попытаемся восполнить этот пробел.

Вернемся к выражению (4) и выделим параметр стружкообразования $x = \frac{a_z}{\rho}$, поделив числитель и знаменатель на величину ρ^2 . Получим:

$$\operatorname{tg}^2 \gamma = \frac{1 + 2x \operatorname{tg}^2 \gamma_3 + (x \operatorname{tg}^2 \gamma_3)^2}{2x + (x \operatorname{tg}^2 \gamma_3)^2}.$$

После преобразования имеем:

$$2x \operatorname{tg}^2 \gamma + x^2 \operatorname{tg}^2 \gamma \operatorname{tg}^2 \gamma_3 = 1 + 2x \operatorname{tg}^2 \gamma_3 + x^2 \operatorname{tg}^4 \gamma_3,$$

$$\operatorname{tg}^2 \gamma_3 (\operatorname{tg}^2 \gamma_3 - \operatorname{tg}^2 \gamma) x^2 + 2(\operatorname{tg}^2 \gamma_3 - \operatorname{tg}^2 \gamma) x + 1 = 0.$$

Обозначим разность $\operatorname{tg}^2 \gamma_3 - \operatorname{tg}^2 \gamma = K$; тогда $K \operatorname{tg}^2 \gamma_3 x^2 + 2Kx + 1 = 0$. Решаем данное квадратное уравнение относительно x . Искомый корень находим из выражения: $x = -\operatorname{ctg}^2 \gamma_3 \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{-K}} \right)$, т. е. параметр стружкообразования может

быть выражен через угол ε при вершине абразивного зерна (поскольку $\gamma_3 = \frac{\varepsilon}{2}$) и текущий передний угол γ по формуле:

$$\frac{a_z}{\rho} = -\text{ctg}^2 \gamma_3 \left(1 - \frac{\text{tg} \gamma}{\sqrt{\text{tg}^2 \gamma - \text{tg}^2 \gamma_3}} \right). \quad (6)$$

В знаменателе левой части выражения (6) присутствует параметр ρ — радиус вершины гиперболы. Однако в данном случае корректно рассматривать не радиус в вершине гиперболы, а радиус кривизны r в точке на уровне плоскости заготовки. Между ними существует следующая зависимость:

$$r = \frac{\rho}{\cos^3 \alpha}, \quad (7)$$

где α — угол между нормалью в рассматриваемой точке и радиусом вектором, проведенным из фокуса гиперболы к данной точке.

С учетом этого выражение (6) примет вид:

$$\frac{a_z}{\rho} = -\text{ctg}^2 \gamma_3 \left(1 - \frac{\text{tg} \gamma}{\sqrt{\text{tg}^2 \gamma - \text{tg}^2 \gamma_3}} \right) \times \cos^3 \alpha. \quad (8)$$

Значение переднего угла в формуле (8) можно определить из выражения (1) по следующей формуле (Никифоров, 2006):

$$\gamma > \arcsin \left[\frac{1}{1 + \mu^2} \left(\frac{\mu^2}{\eta} - \sqrt{1 + \mu^2 - \left(\frac{\mu}{\eta} \right)^2} \right) \right]. \quad (9)$$

Подставляя (9) в выражения (6) или (8) появляется возможность определить параметр стружкообразования. На рис. 1 показано влияние обобщенного коэффициента трения μ и коэффициента усадки стружки на величину $\frac{a_z}{\rho}$ — результаты расчета по формулам (9) и (6). Угол при вершине зерна приравнен углу между асимптотами гиперболы и принят равным 90° .

Графики показывают, что значения параметра стружкообразования действительно может варьировать в довольно широком диапазоне. Очевидно, что имеющиеся в литературных источниках данные получены для конкретных условий обработки и обусловлены действующими значениями коэффициентов трения, скоростью резания, обрабатываемым материалом, которые в свою очередь определяют величину усадки стружки. Влияние же внешнего и внутреннего трения на параметр стружкообразования, как мы видим, чрезвычайно велико именно в диапазоне преимущественных значений коэффициента трения при шлифовании — от 0,1 до 0,4 (Филимонов, 1979). Это объясняется тем, что для зерна внешнее и внутреннее трение — это внешняя направленная нагрузка, которая определяет возможность ее преодоления в зависимости от направления вектора приложенной силы.

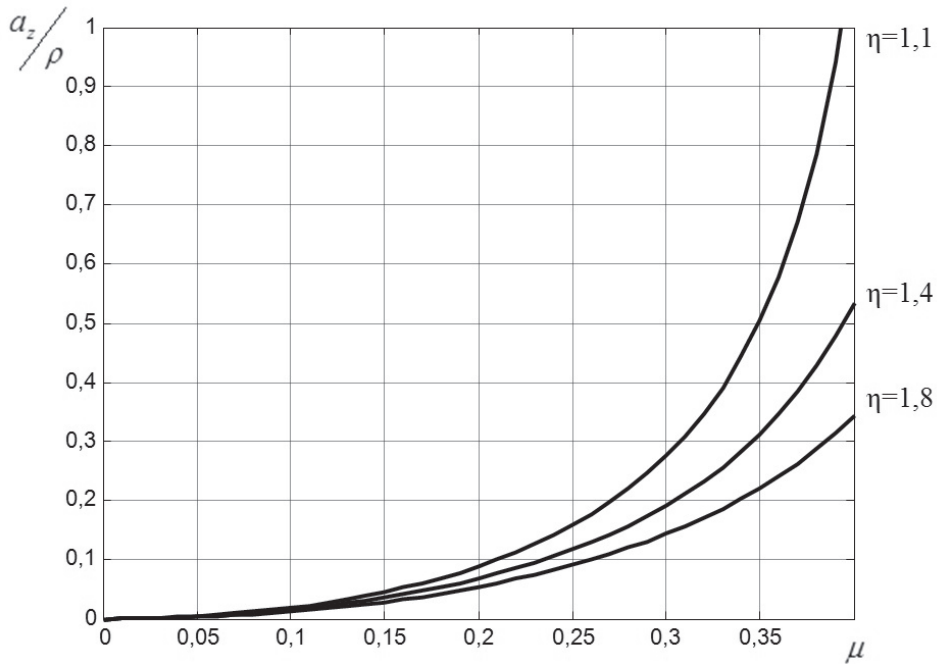


Рис. 1. Влияние коэффициентов внешнего и внутреннего трения и усадки стружки на параметр стружкообразования

Проф. Кравченко Б. А. (Кравченко, 2000) предложил угол внутреннего трения принять равным углу текстуры, что вполне правомерно и логично. Это позволяет все виды основных нагрузок на единичное зерно представить в угловых единицах. Поскольку проекция результирующей силы резания на след плоскости текстуры должна быть положительной (Никифоров, 2007), то должно выполняться неравенство:

$$\Sigma = \beta_1 + \xi + \psi - \gamma < \frac{\pi}{2}, \quad (10)$$

где Σ — нагрузка на абразивное зерно в угловых единицах; β_1 — угол сдвига; ξ — угол внешнего трения, ψ — угол внутреннего трения (угол текстуры), γ — передний угол в окрестности линии режущей кромки в главной секущей плоскости (рис. 2).

Значение коэффициента трения $\mu^2 = \text{tg}\psi$ можно определить из формул, приведенных в работе (Никифоров, 2007):

$$\mu^2 = \frac{2}{\Delta + \sqrt{\Delta^2 + 4}}, \quad (11)$$

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

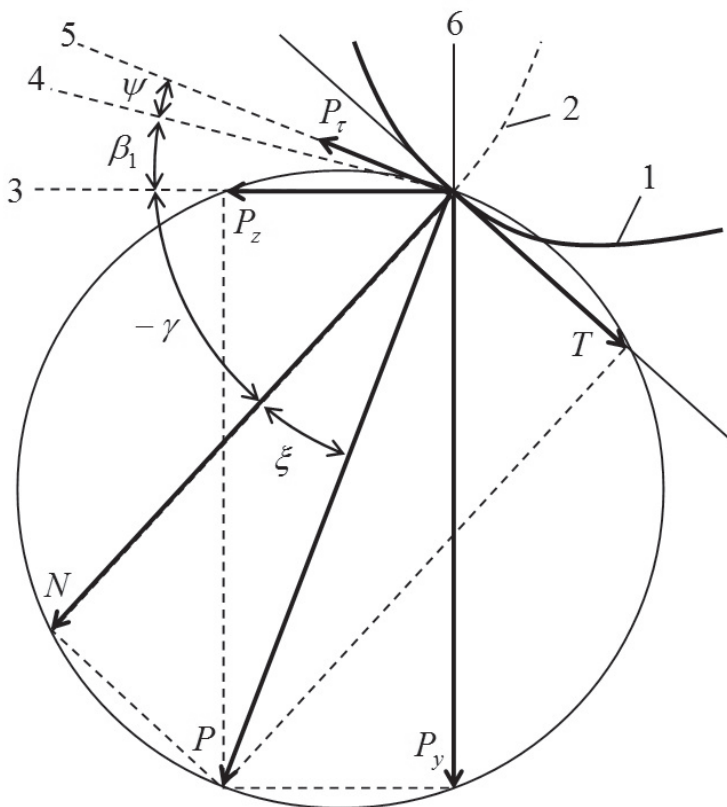


Рис. 2. Схема сил, действующих в окрестности линии режущей кромки:

1 — контур абразивного зерна; 2 — линия режущей кромки;

3 — след плоскости резания; 4 — след плоскости сдвига;

5 — след плоскости текстуры;

6 — след основной плоскости; P — равнодействующая сила резания;

P_y — радиальная составляющая силы резания;

P_z — тангенциальная составляющая силы резания;

N — нормальная составляющая силы резания; T — сила внешнего трения;

P_τ — сила сдвига (деформации), действующая в плоскости текстуры

Учитывая, что $\operatorname{tg}\beta_1 = \frac{\cos\gamma}{\eta - \sin\gamma}$ и $\operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma) = \frac{\operatorname{tg}\beta_1 - \operatorname{tg}\gamma}{1 + \operatorname{tg}\beta_1 \operatorname{tg}\gamma}$ после соответствующих преобразований получим:

$$\Delta = \frac{\eta^2 + 1}{\eta \cos\gamma} - 2\operatorname{tg}\gamma. \quad (12)$$

С точки зрения контактного взаимодействия на атомном уровне внешнее и внутреннее трение имеют одинаковую природу. Суть данной теории заключается в том, что каждый элементарный дискретный акт скольжения атомных

слоев друг относительно друга сопровождается резким (необратимым) разрывом связей между атомами контактирующих тел и, с другой стороны, таким же внезапным образованием новых связей — происходит т. н. «адгезионная лавина» (Дедков, 1998).

Внутреннее трение — рассеивание энергии упругих волн за счет внутренних процессов в твердом теле, имеет свои особенности и может быть вызвано различными видами процессов (Блантер, 2004):

- релаксация Снука — перераспределение внедренных атомов в кристаллической решетке под действием напряжений;
- релаксация Зинера — диффузия в твердых растворах замещения;
- зернограничная релаксация — движение под действием напряжения границ зерен-кристаллитов;
- дислокационная релаксация (Хасигути, Бордони, Снука–Кестера и пр.) — движение различных видов дислокаций;
- фазовая релаксация — вызванная фазовыми превращениями в твердых телах и др.

Уменьшение внутреннего и внешнего трения является, на наш взгляд, одним из перспективных направлений трибологии, в том числе применительно к абразивным видам обработки материалов. Это позволит уменьшить долю энергии, расходуемую на пластическую деформацию по задней поверхности абразивного зерна и увеличить долю энергии на выполнение деформации сдвига в границах передней поверхности. Положение линии режущей кромки, несомненно, будет изменяться, поскольку процесс микрорезания — это процесс синергетический.

Выводы.

1) Влияние различных факторов на степень пластической деформации срезаемого слоя может проявиться лишь через соответствующее их влияние на изменение коэффициентов внешнего трения стружки по передней поверхности режущего инструмента и внутреннего трения обрабатываемого материала в окрестности линии режущей кромки.

2) Роль внешнего и внутреннего трения в процессах, происходящих в зонах фрикционного контакта, чрезвычайно велика. Например, их величина определяет положение линии режущей кромки, поскольку процесс микрорезания является синергетическим.

3) Параметр стружкообразования a_z/ρ действительно может варьировать в широком диапазоне значений, определяемых, преимущественно, величиной внешнего и внутреннего трения и усадкой стружки.

Литература

1. Блантер М. С. Что такое внутреннее трение / М. С. Блантер // Соросовский образовательный журнал. Т. 8. 2004. № 1. С. 80–85.

2. Дедков Г. В. Адгезионный механизм трения в нанотрибоконтактах / Г. В. Дедков // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 19. С. 44–50.
3. Кравченко Б. А. Стружка — источник информации о предыстории процесса резания / Б. А. Кравченко // Вестник СамГТУ. Сер. «Технические науки». 2000. № 10. С. 118–121.
4. Крагельский. И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. М. : Машгиз, 1962. 383 с.
5. Никифоров И. П. Анализ моделей абразивных зерен / И. П. Никифоров, П. Н. Мальцев, Е. Н. Иванов // Труды Псковск. политехн. ин-та. Машиностроение. Электротехника. 2011. Вып. 14.3. С. 300–303.
6. Никифоров И. П. Номограммы резания при шлифовании / И. П. Никифоров // Труды Псковск. политехн. ин-та. Машиностроение. Электротехника. 2009. Вып. 12.3. С. 202–207.
7. Никифоров И. П. О некоторых пробелах в теории шлифования / И. П. Никифоров // Металлообработка. 2007. № 1. С. 2–8.
8. Никифоров И. П. Условие стружкообразования при шлифовании / И. П. Никифоров // Известия вузов. Машиностроение. 2006. № 10. С. 63–68.
9. Розенберг А. М. Факторы, влияющие на процесс деформации при резании / А. М. Розенберг, К. А. Нассонов // Известия Томского политехнического института. 1957. Т. 85. С. 118–131.
10. Филимонов, Л. Н. Высокоскоростное шлифование. Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. 248 с.

I. P. Nikiforov, P. N. Maltsev

THE ROLE OF EXTERNAL AND INTERNAL FRICTION IN THE PROCESS OF THE MICROCUTTING BY THE ABRASIVE GRAIN

The criteria required for the formation of chips during microcutting by abrasive grain are shown. The expressions for determining the parameter formation of chips are analytically obtained. The role of external and internal friction in the frictional interaction process between the abrasive grain and the surface of the workpiece are shown.

Keywords: abrasive grain, external friction, internal friction, tool rake, parameter formation of chips, chip contraction, cutting edge.

Никифоров Игорь Петрович — профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, д-р техн. наук, доцент, Nikiforov.i.p@mail.ru.

Мальцев Павел Николаевич — инженер кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, Inertan@gmail.com.