

Л и т е р а т у р а

1. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. - Саратов: СГУ, 1975.
2. Урывский Ф.П., Трусов В.Н., Копытин Ю.А. Установка для моделирования быстротекущих тепловых процессов. - В сб.: Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов. Вып. 5. - Куйбышев: КуАИ, 1978.
3. Шоршоров М.Х., Белов В.В. Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке. - М.: Наука, 1972.

УДК 621.923.1:621.922.34

В.И.Стебихов, Л.А.Сухинина

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ПЛОСКОМ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ ТОРЦЕМ КРУГА

Силы, возникающие при плоском шлифовании твердых сплавов торцем алмазного круга, измерялись с помощью динамометра УДМ-1 конструкции ВНИИ с записью сигналов на фотобумагу с помощью осциллографа Н700. Измерялись две составляющие: тангенциальная (P_x) и нормальная к обрабатываемой поверхности (P_y). Сила подачи P_z составляет 8-10% от силы P_y ($P_y=25...80$ Н) и практического значения не имеет.

Как показали исследования, изменение зернистости в пределах АСМ40-АСО16 не оказывает существенного влияния на изменение сил резания. Увеличение концентрации алмазов в круге приводит к уменьшению сил резания. Особенно значительно влияние концентрации и связки при $S_{\text{поп}} \geq 0,010$ мм/дв.х. Наименьшие силы резания возникают при шлифовании кругами на связках Б1, Б3, Б4 [1].

При увеличении поперечной и продольной подачи силы резания возрастают, в большей мере с увеличением поперечной подачи. Например, при увеличении поперечной подачи в 4 раза силы резания возрастают примерно в 3,7 раза, а при увеличении продольной подачи в такое же число раз - только в 2,4 раза. Это объясняется тем, что с увеличением поперечной подачи увеличивается не только поперечное сечение стружки, но возрастает и площадь контакта связки-наполнителя с обрабатываемой поверхностью.

С увеличением скорости круга силы резания уменьшаются, так как снижается нагрузка на каждое алмазное зерно в виду уменьшения сечения среза.

При доводке твердосплавных пластин алмазным кругом силы резания в 2-5 раз ниже, чем при доводке обычными алмазными кругами. Это объясняется свойствами алмазных зерен: их большой твердостью, прочностью, теплопроводностью, малыми радиусами округления вершин и углов граней зерна, что облегчает процесс резания.

Для расчета составляющих силы резания обычно используются эмпирические формулы степенного вида:

$$P = Ct^x s^y v^z.$$

Формулы такого вида не имеют ясного физического смысла и не позволяют сравнивать силы резания при различных процессах. Как показано в работах [2], [3], применительно к процессам фрезерования и точения сила резания может быть представлена как состоящая из двух частей: сил, действующих на передней поверхности инструмента, и сил, действующих на задней поверхности. Так, для главной составляющей P_z можно записать:

$$P_z = P_{пп} + P_{зп} = C_{пп} F_{сумм} + C_{зп} \Sigma L.$$

Здесь $P_{пп}$, $P_{зп}$ - силы, приложенные на передней и задней поверхностях инструмента, Н;

$C_{пп}$ - коэффициент, зависящий от касательного напряжения в зоне сдвига, переднего угла, коэффициента трения и степени упрочнения материала, Н/мм²;

$F_{сумм}$ - суммарное сечение среза, мм²;

$C_{зп}$ - коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала, скорости резания, температуры, износа инструмента по задней поверхности, Н/мм²;

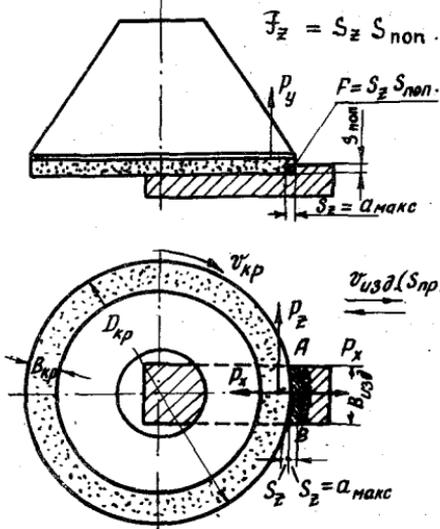
ΣL - суммарная длина режущих кромок инструмента, находящихся в контакте с поверхностью резания, мм.

Другая составляющая, нормальная к поверхности резания, также может быть выражена как сумма сил на передней и задней поверхностях. Так как сила P_x при алмазном шлифовании мала, то можно принять:

$$P_y = Q_{пп} + Q_{зп} = U_{пп} F_{сумм} + U_{зп} \Sigma L.$$

Нами сделана попытка применить уравнение сил резания в форме двучлена к плоскому шлифованию торцом алмазного круга. Для вывода сделаны некоторые предположения и допущения.

Принимая, что алмазное зерно имеет кубическую форму, выразим наибольшее сечение среза, снимаемое одним зерном, (рис. I) в виде



Здесь $S_{\max} = S_z$ — наибольшая толщина среза, равная подаче на одно режущее зерно, мм/зерно;

$S_{\text{поп}}$ — поперечная подача круга, определяющая глубину шлифования, мм/дв.х.

Рассмотрение осциллограмм сил резания P_x и P_y показывает, что силы достигают максимума лишь после врезания круга в заготовку на

какую-то величину, т.е. когда в резании участвует определенное количество рядов режущих зерен по ширине круга:

$$z_{\text{в.кр}} = \frac{c B_{\text{кр}}}{l}$$

где c — коэффициент, показывающий на какую величину должен врезаться круг, чтобы силы достигли максимального значения. Он рассчитывается по осциллограммам сил резания (в нашем случае $c = 0,37$).

Число зерен в одном ряду

$$z_{\text{л.к}} = \frac{l_{\text{к}}}{l} \approx \frac{v_{\text{узд}}}{l}$$

где $B_{кр}$ - ширина круга, мм;
 $B_{узг}$ - толщина пластины, мм;
 ℓ - среднее расстояние между алмазными зернами (мм), принятое по формуле [4]

$$\ell = \sqrt[3]{5m W_0} ;$$

m - показатель концентрации алмазов ($m = 0,5$ при концентрации 200%, $m = 1,0$ при - 100% и т.д.);

W_0 - объем алмазного зерна в мм³, рассчитываемый по формуле

$$W_0 = \frac{1}{6} \pi d^3,$$

соответствует шару, вписанному в куб.

Для упрощения анализа примем зерна одинаково нагруженными, хотя фактически часть из них снимает гребешки и неровности, оставшиеся от впереди идущих зерен. Пренебрегаем также характером фактического расположения зерен в круге, степенью их перекрытия, разной высотой выступания.

В связи со сказанным, суммарное сечение среза, снимаемое всеми режущими зернами при максимальном значении P_z и P_y , может быть определено в виде

$$F_{сумм} = F_z z_{к общ} = (S_z S_{пол}) \left(\frac{c B_{кр}}{\ell} \right) \left(\frac{B_{узг}}{\ell} \right).$$

При плоском шлифовании длина режущих кромок одного зерна, находящихся в контакте с изделием, равна $S_z + S_{пол}$, а суммарная длина

$$\sum \ell = (S_z + S_{пол}) z_{к общ} = (S_z + S_{пол}) \frac{c B_{узг} B_{кр}}{\ell^2}.$$

Исходя из изложенного, силы $P_{z max}$ и $P_{y max}$, действующие на круг, можно определить по формулам:

$$P_{z max} = P_{пн} + P_{зн} = C_{пн} (S_z S_{пол}) \frac{c B_{узг} B_{кр}}{\ell^2} +$$

(I)

$$+ C_{зн} (S_z + S_{пол}) \frac{c B_{узг} B_{кр}}{\ell^2} ;$$

$$P_{y \max} = Q_{nn} + Q_{zn} = U_{nn} (S_z S_{non}) \frac{c V_{usz} V_{кр}}{\ell^2} + \quad (2)$$

$$+ U_{zn} (S_z + S_{non}) \frac{c V_{usz} V_{кр}}{\ell^2}.$$

Для плоского шлифования торцом круга [5]:

$$S_z = a_{\max} = \frac{V_{usz}}{60 V_{кр}} \frac{\pi D_{кр}}{z},$$

где V_{usz} - скорость наделя, в нашем случае равная $S_{пр}$, м/мин;

$V_{кр}$ - скорость круга, м/с;

$D_{кр}$ - наружный диаметр круга, мм;

z - общее число зерен по окружности круга, $z = \frac{\pi D_{кр}}{\ell}$.

После преобразования формулы (1) и (2) принимает следующий вид

$$P_z \max = \frac{c V_{usz} V_{кр}}{60} \left[C_{nn} \left(\frac{V_{usz}}{V_{кр}} \frac{S_{non}}{\ell} \right) + \right. \\ \left. + C_{zn} \left(\frac{V_{usz}}{V_{кр}} \frac{1}{\ell} + \frac{60 S_{non}}{\ell^2} \right) \right]; \quad (3)$$

$$P_y \max = \frac{c V_{usz} V_{кр}}{60} \left[U_{nn} \left(\frac{V_{usz}}{V_{кр}} \frac{S_{non}}{\ell} \right) + \right. \\ \left. + U_{zn} \left(\frac{V_{usz}}{V_{кр}} \frac{1}{\ell} + \frac{60 S_{non}}{\ell^2} \right) \right]. \quad (4)$$

Из формулы (3) и (4) видно, что влияние элементов режима резания на силы P_z и P_y соответствует опытным данным. Что касается расстояния между зернами ℓ , то согласно формулам (3) и (4), его увеличение должно привести к уменьшению сил резания. Из опытов следует, что с уменьшением концентрации и увеличением зернистости силы резания возрастает, что вызвано увеличением площади контакта связки с обрабатываемым материалом. Это влияние связки в формулах (3) и (4) учтено коэффициентами C_{nn} , C_{zn} , U_{nn} , U_{zn} , полученными из экспериментальных данных. Указанные коэффициенты отражают также отклонение действительной формы зерна от принятой в расчете кубической формы, влияющей на механизм резания.

Окончательно для наших условий получаем:

$$P_{z \max} = 495 \frac{v_{\text{изг}} S_{\text{ноп}}}{v_{\text{кр}} \ell} + 0,015 \left(\frac{v_{\text{изг}}}{v_{\text{кр}} \ell} + \frac{60 S_{\text{ноп}}}{\ell^2} \right); \quad (5)$$

$$P_{y \max} = 1980 \frac{v_{\text{изг}} S_{\text{ноп}}}{v_{\text{кр}} \ell} + 0,036 \left(\frac{v_{\text{изг}}}{v_{\text{кр}} \ell} + \frac{60 S_{\text{ноп}}}{\ell^2} \right). \quad (6)$$

Проверка полученных формул путем сопоставления с экспериментальными данными показала удовлетворительную сходимость.

Выведенные формулы для P_z и P_y в виде суммы двух слагаемых в принципе соответствуют основным уравнениям механики резания [4], согласно которым, например, при $\gamma = 0$,

$$P_z = N + F_Q; \quad P_y = Q + F_N,$$

где N — сила сопротивления пластическим деформациям;

Q — сила сопротивления внедрению по задней поверхности;

F_N, F_Q — соответствующие силы трения.

Исходя из сказанного, представляется возможным выяснить роль трения в процессе алмазного шлифования-доводки. Для этого определим на примерах удельный вес второго слагаемого в формуле (5) для $P_{z \max}$ и первого — для $P_{y \max}$ в формуле (6), которые соответствуют силам F_Q и F_N и обозначены в предыдущем через $P_{zп}$ и $Q_{пп}$. Результаты соответствующих расчетов приведены в таблице. Из таблицы видно, что с увеличением скорости изделия в 4 раза доля трения по передней поверхности в формировании силы P_y характеризуемая отношением $\frac{Q_{пп}}{P_y}$, увеличивается, что связано с увеличением сопротивления пластическим деформациям, и составляет в среднем 80%. Доля трения по задней поверхности в формировании силы P_z , характеризуемая отношением $\frac{P_{zп}}{P_z}$, уменьшается в связи с постоянством силы внедрения $Q_{зп}$. В среднем сила трения по задней поверхности составляет от 20 до 48% от сил P_z . С увеличением поперечной подачи доля трения по передней и задней поверхностям в формировании сил P_y и P_z не изменяется в связи с одинаковой интенсивностью возрастания сил, входящих в указанные выше соотношения, и составляет 66 и 48%. Удельный вес трения в формировании равнодейст-

Расчет значений степеней сил P_z и P_y

Размеры и характеристика круга	№ опыта	Режим обработки			$P_{зп}$, Н	P_z , Н	$\frac{P_z}{100\%}$	$Q_{мн}$, Н	$Q_{зп}$, Н	P_y , Н	$\frac{Q_{мн}}{100\%}$	$\sqrt{P_z + Q_{мн}}$	$\sqrt{P_z + P_y}$
		$V_{двг}$, м/с	$V_{кр}$, м/с	$S_{пр}$, мм/об.х									
АЧ200х10х3 АСО6-Б1-50%	1	0,008	30	0,005	3,2	6,7	47,7	14,4	7,4	21,8	66	65	
	2	0,016	30	0,005	3,2	10	31,8	27,3	7,4	34,7	78,5	76	
	3	0,024	30	0,005	3,2	13,5	23,7	40,5	7,5	48	84,5	81,5	
	4	0,032	30	0,005	3,25	17	19	55,3	7,5	63	88	85	
	5	0,008	30	0,010	6,3	13,2	47,5	27,8	14,8	42	65,4	64	
	6	0,008	30	0,015	9,5	19,8	48,0	41,5	22	63,3	65,6	64	
	7	0,008	30	0,020	12,5	26,3	47,5	55,5	29,6	85	65,3	64,2	

вудшей силы резания, определяемый коэффициентом

$$K_0 = \frac{\sqrt{P_{\text{ап}}^2 + Q_{\text{пп}}^2}}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}} 100\%$$

колеблется в пределах 65–85%, что характеризует процесс шлифования как процесс с большим удельным весом трения. В этом смысле он приближается к таким сложным процессам, как фрезерование и нарезание резьбы метчиками.

Проведенный анализ позволяет также высказать некоторые соображения по соотношению сил при абразивном и алмазном шлифовании. Это отношение для разных режимов обработки, как указано выше, колеблется в пределах 2–5 [1]. В свете выдвинутого, причину этого увеличения следует искать, как показывают расчеты, в увеличении сил трения в связи с повышенным коэффициентом трения абразивных материалов в паре с металлом по сравнению с алмазами.

Л и т е р а т у р а

1. С у х и н и н а Л.А. Качество поверхности, силы и температура резания при алмазной шлифовке-доводке твердосплавных инструментов: Тезисы докладов научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.И.Ленина. - Куйбышев: КуАИ, 1970.
2. Р о з е н б е р г А.М., К у ф а р е в Г.Д., Р о з е н - б е р г Ю.А. Новые зависимости для расчета сил резания при фрезеровании. - В сб.: Обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов. Вып. ХУИ. - Куйбышев: КуАИ, 1963.
3. Р е з н и к о в Н.М., С т е б и х о в В.И. Исследование сил резания при обработке жаропрочных сплавов твердосплавными винтовыми фрезами. - В сб.: Производительность, качество обработки и надежность в эксплуатации изделий из жаропрочных и титановых сплавов. - Куйбышев; КуАИ, 1970.
4. Х р у л ь к о в В.А., Г о л о в а н ь Л.И. Особенности алмазного шлифования и доводки деталей из металлокерамических твердых сплавов. - В сб.: Алмазный инструмент и процессы алмазной обработки. - М.: 1964.
5. Р а з а н и к о в Н.И. Учение о резании металлов. - М.: 1947.