

### ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

А. М. РОЗЕНБЕРГ, Г. Л. КУФАРЕВ, Ю. А. РОЗЕНБЕРГ,  
А. А. КОЗЛОВ, С. И. ТАХМАН

По вопросам динамики фрезерования цветных металлов до настоящего времени исследовательских работ проведено не было.

Создание высокоскоростных станков типа 6М12Б с максимальным числом оборотов шпинделя  $n = 5000 \div 6000$  об/мин, предназначенных в основном для обработки цветных металлов, требует точных сведений о силах резания при фрезеровании этих металлов, так как иначе не представляется возможным определить необходимую мощность, которая на высоких скоростях резания будет достигать значительных величин.

В настоящей работе рассматриваются вопросы динамики фрезерования семи марок цветных металлов. Механические свойства их приведены в табл. 1.

Таблица 1

| №№ пп | Марка металла | Предел прочности при растяж.<br>$\sigma_b$ кг/мм <sup>2</sup> | Относительное удлинение при разрыве $\Delta\%$ | Твердость $H_B$ |
|-------|---------------|---|--|-----------------|
| 1     | Л62           | 32,2  | 46   | 65—69           |
| 2     | ЛС59-1        | 37,5  | 30   | 85—89           |
| 3     | БрАЖ9-4       | 58,4  | 33,8   | 149—156         |
| 4     | Д-1           | 28  | 13   | 79—80           |
| 5     | Ал-10         | 8   | 0  | 95—103          |
| 6     | Ал-4          | 11,7  | 0  | 60—65           |
| 7     | Медь          | 21  | 46,8   | 49—52           |

Исследования проводились на горизонтально-фрезерном станке 6Н83 и вертикально-фрезерном станке 6Н13П, оснащенных упруго-электрической аппаратурой с индуктивными датчиками, что позволяло в процессе опыта одновременно измерять крутящий момент на шпинделе и силу подачи.

Температура в зоне резания измерялась с помощью естественной термопары. В качестве режущего инструмента использовались цилиндрические фрезеры быстрорежущие (Р18) и твердосплавные (Т15К6), а также торцевые быстрорежущие (Р18) и твердосплавные (ВК8).

Изменение основных геометрических параметров фрез приведено в табл. 2.

В работе изучалось влияние на силы резания следующих факторов: скорости резания, подачи на зуб, глубины фрезерования, ширины фрезерования, переднего угла, износа зубьев фрезы, угла в плане и относительного расположения торцевой фрезы и заготовки.

Таблица 2

| Геометрические параметры     | В и Д фрезерования |              |
|------------------------------|--------------------|--------------|
|                              | Цилиндрическое     | Торцевое     |
| Диаметр фрезы $D$ мм         | 27 ÷ 125 мм        | 100 ÷ 200 мм |
| Передний угол $\gamma^\circ$ | 0 ÷ 29°            | 0 ÷ + 30°    |
| Угол в плане $\varphi^\circ$ | —                  | 30° ÷ 90°    |

Обычно принято выражать зависимость сил резания при фрезеровании от различных параметров в виде степенных уравнений.

Наиболее полные и теоретически обоснованные уравнения выведены А. М. Розенбергом [1] и имеют следующий вид<sup>1)</sup>

Средняя суммарная окружная сила на цилиндрической фрезе

$$p = \frac{2^{\kappa+1}}{k+2} \cdot c_\beta \cdot \frac{\lambda}{\pi} \cdot B \cdot z s_z^{\kappa+1} \left( \frac{t}{D} \right)^{\frac{\kappa+2}{2}} v^u \text{ кг.} \quad (1)$$

Средняя суммарная окружная сила на торцевой фрезе

$$p = 2^{-\frac{\kappa}{2}} \frac{\lambda}{\pi} \cdot t^{l+1} \cdot z s_z^{\kappa+1} v^u \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{B}{D} \right)^{\frac{\kappa+2}{2}} \right\} \text{ кг,} \quad (2)$$

где  $c_\beta$  — коэффициент, показывающий влияние угла подъема спирали режущей кромки на силу резания;

$t$  — глубина фрезерования в мм;

$B$  — ширина фрезерования в мм;

$s_z$  — подача на 1 зуб фрезы в мм;

$z$  — число зубьев фрезы;

$D$  — диаметр фрезы в мм;

$v$  — скорость резания в м/мин;

$k, l, u$  — показатели степеней;

$\lambda$  — постоянный коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и условий обработки.

При проведении исследований была поставлена задача проверить возможность применения данных уравнений для расчета сил резания при фрезеровании цветных металлов в широком диапазоне изменения всех параметров, входящих в уравнения, и определить постоянные коэффициенты  $\lambda$  и показатели степеней  $k, l, u$  для исследуемых металлов.

Как показали многочисленные эксперименты (в работе проведено более 8000 опытов), разница в значениях сил, полученных по приборам и по уравнениям (1) и (2), лежит в пределах 10%, и только для

<sup>1)</sup> В уравнениях А. М. Розенберга влияние скорости не учитывалось, так как все исследования были проведены при малых скоростях, где влияние скорости не существенно; в уравнениях 1 и 2 влияние скорости учтено.

малых подач, когда абсолютные значения сил невелики, эта разница доходит до 15–20%. Следует отметить, что степенное одночленное уравнение и не может дать более высокой точности расчетов, о чем будет сказано ниже.

### Влияние скорости резания и подачи на силы резания

Одним из основных факторов, влияющих на силы резания, является скорость резания. Благодаря значительной разнице в свойствах исследуемых металлов скорость резания по-разному влияет на силы резания.

При фрезеровании латуни ЛС59-1 и дюралюминия Д-1 влияние скорости столь незначительно, что им можно пренебречь при всех видах фрезерования. Для латуни Л62 и красной меди по мере увели-

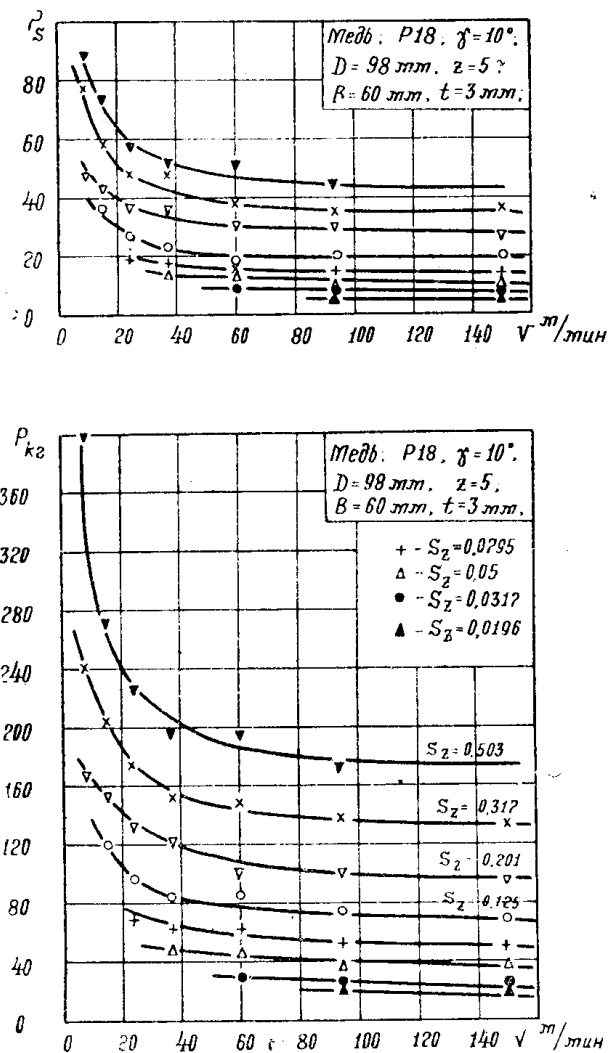


Рис. 1.

чения скорости резания силы уменьшаются, особенно в зоне малых скоростей  $v \leq 100$  м/мин (рис. 1).

Для силумина Ал-10 и Ал-4 зависимость силы от скорости выражается кривыми, характерными для всех металлов, при резании которых образуется нарост (рис. 2).

Исследование влияния скорости на силы резания проведено по восьми подачам, лежащим в пределах  $s_z = 0,0196 \div 0,503$  мм/зуб. На основании этих опытов получены значения постоянных коэффициентов  $\lambda$  и показателей степеней „К“ и „И“, необходимых для расчета сил по уравнениям (1) и (2). Значения этих величин приведены в табл. 3—6.

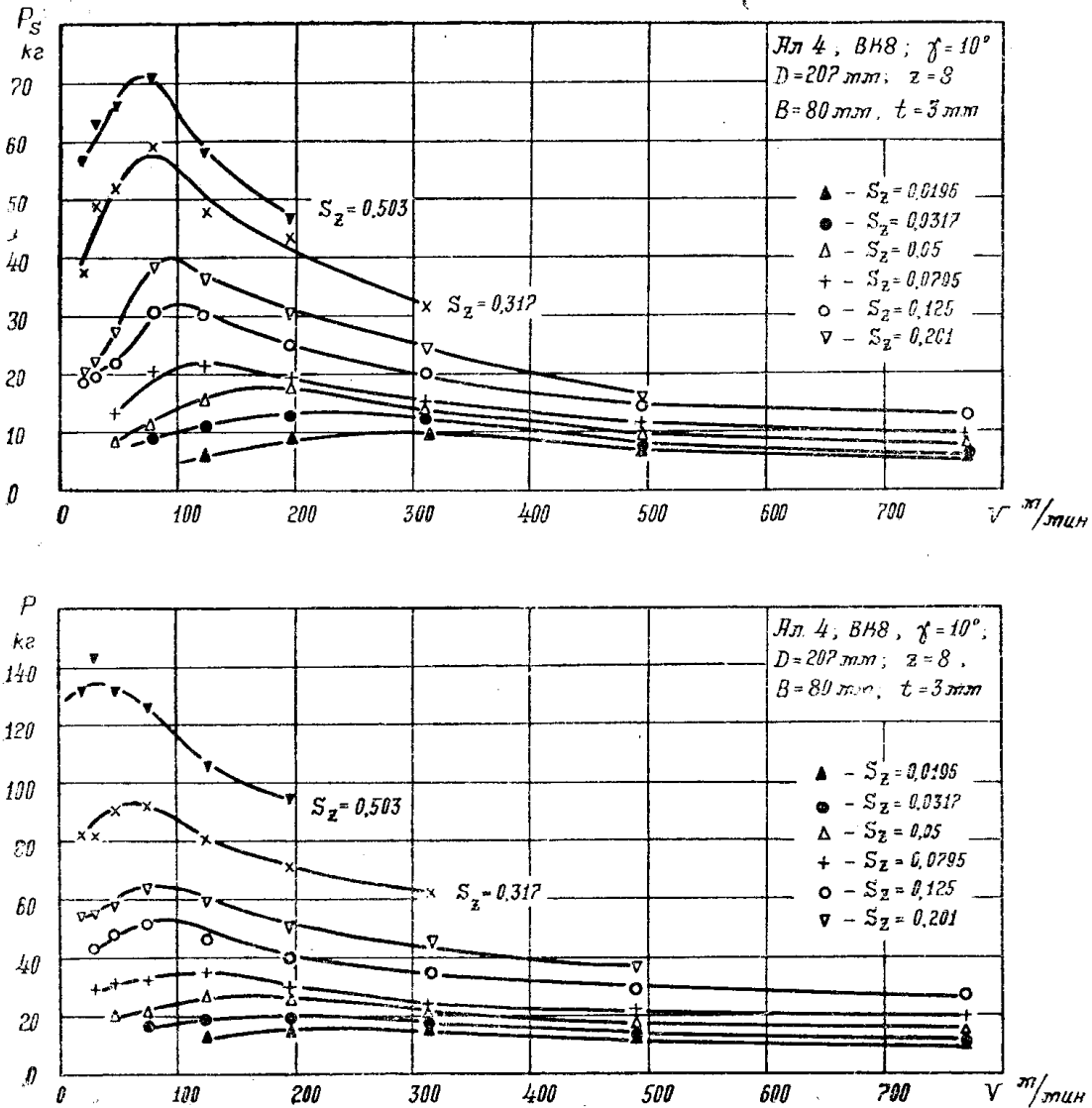


Рис. 2.

### Влияние переднего угла на силы резания

При изменении переднего угла изменяются условия стружкообразования, усадка стружки, а следовательно, и силы резания на передней грани. Силы на задней грани при этом остаются постоянными.

Для малых подач, когда силы на передней грани сравнительно невелики по сравнению с силами на задней грани, изменение переднего угла, влияющего только на силы на передней грани, приводит к очень незначительному изменению суммарной окружной силы. При фрезеровании с большими подачами силы на передней грани оказываются значительно большими, чем на задней грани, и их изменение

Таблица 3

## Цилиндрическое фрезерование быстрорежущими фрезами

| Марка металла | $\kappa$                   | $u$  | $\lambda$ |
|---------------|----------------------------|------|-----------|
| Л62           | -0,15                      | -0,1 | 164       |
| ЛС59-1        | -0,22                      | 0    | 55        |
| БрАЖ9-4       | $S_z \leq 0,08$ $K = -0,4$ | +0,1 | 26,4      |
|               | $S_z > 0,08$ $K = -0,5$    | +0,1 | 100       |
| Д-1           | -0,27                      | 0    | 44        |
| Ал-10         | -0,27                      | +0,1 | 32        |
| Ал-4          | -0,15                      | +0,1 | 41        |
| Медь          | -0,22                      | -0,2 | 307       |

Таблица 4

## Цилиндрическое фрезерование твердосплавными фрезами

| Марка металла | $\kappa$                                     | $u$                                | $\lambda$ |
|---------------|--|------------------------------------|-----------|
| Л62           | -0,22  | -0,1                               | 164       |
| ЛС59-1        | -0,22  | 0                                  | 69        |
| БРАЖ9-4       | -0,15  | $u = -0,065$ при $v \geq 75$ м/мин | 342       |
|               |  | $u = 0$ при $v < 75$ м/мин         | 214       |
| Д-1           | -0,3   | 0                                  | 44        |
| Ал-10         | -0,22  | $S_z \geq 0,1$ $u = +0,1$          | 33        |
|               |  | $S_z < 0,1$ $u = 0$                | 56        |
| Ал-4          | $v \leq v_{\text{разд}}^*)$ $\kappa = -0,22$ | $S_z \geq 0,1$ $u = +0,26$         | 18        |
|               |  | $S_z < 0,1$ $u = +0,6$             | 30        |
|               | $v > v_{\text{разд}}$ $\kappa = -0,5$        | -0,25                              | 148       |
| Медь          | -0,3   | -0,2                               | 322       |

$$*) v_{\text{разд}} = 47 \frac{D^{0,2}}{S_z^{0,4} t^{0,2}} \text{ м/мин,} \quad (2)$$

где  $D$  — диаметр фрезы в мм;  
 $S_z$  — подача на зуб в мм/зуб;  
 $t$  — глубина резания в мм.

Таблица 5

## Торцевое фрезерование быстрорежущими фрезами

| Марка металла      | $\kappa$ | $u$  | $\lambda$ |
|--------------------|----------|--|-----------|
| Л62                | -0,18    | -0,14  | 178       |
| ЛС59-1             | -0,18    | 0  | 60        |
| БрАЖ9-4            | -0,18    | 0  | 107       |
| Д-1                | -0,18    | 0  | 64        |
| Ал-10<br>и<br>Ал-4 | -0,25    | $v \geq 40$ м/мин<br>$s_z \geq 0,15$ мм/зуб<br>$u = -0,14$ | 94        |
|                    |          | $v < 40$ м/мин<br>$s_z \geq 0,15$ мм/зуб<br>$u = 0$        | 52        |
|                    |          | $v > 0$<br>$s_z < 0,15$ мм/зуб<br>$u = 0$                  | 52        |
| Медь               | -0,36    | -0,17  | 203       |

Таблица 6

## Торцевое фрезерование твердосплавными фрезами

| Марка металла | $\kappa$ | $u$                           | $\lambda$ |
|---------------|----------|-------------------------------|-----------|
| Л62           | -0,22    | $v < 200$ м/мин $u = -0,14$   | 200       |
|               |          | $v \geq 200$ м/мин $u = 0$    | 92        |
| ЛС59-1        | -0,18    | 0                             | 60        |
| БРАЖ9-4       | -0,18    | 0                             | 107       |
| Д-1           | -0,18    | 0                             | 66        |
| Ал-10         | -0,36    | $v \geq 75$ м/мин $u = -0,25$ | 181       |
|               |          | $v < 75$ м/мин $u = 0$        | 55        |
| Ал-4          | -0,36    | $v \geq 75$ м/мин $u = -0,25$ | 200       |
|               |          | $v < 75$ м/мин $u = 0$        | 65        |
| Медь          | -0,36    | -0,25                         | 327       |

при постоянстве сил на задней грани приводит к существенному уменьшению средней окружной силы по мере увеличения переднего угла.

В табл. 7 приведены значения поправочных коэффициентов  $k_\gamma$  для различных подач при фрезеровании цилиндрическими твердосплавными фрезами.

Таблица 7

| Марка металла | Подача<br>мм/зуб $S_z$ | $k_\gamma$         |                     |                     |
|---------------|------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
|               |                        | $\gamma = 0^\circ$ | $\gamma = 10^\circ$ | $\gamma = 20^\circ$ |
| Л62           | 0,02                   | 1,12               | 1                   | 0,88                |
|               | 0,05                   | 1,16               |                     | 0,84                |
|               | 0,125                  | 1,16               |                     | 0,85                |
|               | 0,317                  | 1,14               |                     | 0,84                |
| ЛС59-1        | 0,02                   | 1                  | 1                   | 1                   |
|               | 0,05                   | 1,06               |                     | 0,95                |
|               | 0,125                  | 1,1                |                     | 0,9                 |
|               | 0,317                  | 1,2                |                     | 0,8                 |
| Д-1           | 0,02                   | 1,14               | 1                   | 0,86                |
|               | 0,05                   | 1,19               |                     | 0,8                 |
|               | 0,125                  | 1,2                |                     | 0,81                |
|               | 0,317                  | 1,21               |                     | 0,79                |
| Ал-10         | 0,02                   | 1,0                | 1                   | 1                   |
|               | 0,05                   | 1,1                |                     | 0,9                 |
|               | 0,125                  | 1,13               |                     | 0,87                |
|               | 0,317                  | 1,27               |                     | 0,73                |
| Ал-4          | 0,02                   | 1,1                | 1                   | 0,89                |
|               | 0,05                   | 1,43               |                     | 0,58                |
|               | 0,125                  | 1,5                | 1                   | 0,5                 |
|               | 0,317                  | 1,43               |                     | 0,6                 |
| Медь          | 0,02                   | 1,4                | 1                   | 0,6                 |
|               | 0,05                   | 1,4                |                     | 0,6                 |
|               | 0,125                  | 1,4                |                     | 0,6                 |
|               | 0,317                  | —                  |                     | —                   |

Для остальных видов фрезерования в табл. 8 приведены средние значения поправочных коэффициентов  $k_\gamma$  для всех подач.

Для  $\gamma = 10^\circ$  поправочный коэффициент для всех видов фрезерования равен  $k_\gamma = 1$ . Как видно из таблиц, наибольшее влияние переднего угла наблюдается при фрезеровании наиболее пластичного металла, красной меди, что полностью соответствует вышеуказанным предположениям.

#### Влияние износа на силы резания

Значительное влияние на силы резания при фрезеровании цветных металлов оказывает износ зубьев фрезы. Износ протекает по

Таблица 8

| Марка металла | $K_{\gamma_{\text{ср}}}$            |                     |                     |                               |                     |                               |                     |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|
|               | Цилиндрическая быстро-режущая фреза |                     |                     | Торцевая быстро-режущая фреза |                     | Торцевая твердосплавная фреза |                     |
|               | $\gamma = 0$                        | $\gamma = 20^\circ$ | $\gamma = 30^\circ$ | $\gamma = 20^\circ$           | $\gamma = 30^\circ$ | $\gamma = 0$                  | $\gamma = 20^\circ$ |
| Л62           | 1,2                                 | 0,88                | 0,8                 | 0,9                           | 0,82                | 1,14                          | 0,87                |
| ЛС59-1        | 1,15                                | 0,9                 | 0,85                | 0,92                          | 0,83                | 1,1                           | 0,92                |
| БрАЖ9-4       | 1,2                                 | 0,84                | 0,72                | 0,88                          | 0,78                | 1,14                          | 0,87                |
| Д-1           | 1,14                                | 0,9                 | 0,85                | 0,88                          | 0,76                | 1,26                          | 0,75                |
| АЛ-10         | 1,15                                | 0,85                | 0,79                | 0,89                          | 0,78                | 1,14                          | 0,85                |
| АЛ-4          | 1,18                                | 0,89                | 0,82                | 0,87                          | 0,76                | 1,37                          | 0,65                |
| Медь          | 1,42                                | 0,76                | 0,56                | 0,75                          | 0,57                | 1,25                          | 0,74                |

задним граням. При этом увеличивается площадь контакта зубьев фрезы с поверхностью резания, что приводит к росту сил на задней грани, тогда как силы на передней грани остаются практически неизменными.

Так как силы на задней грани не зависят от подачи, то добавка к окружной силе должна быть постоянной при определенном износе для всех подач. Это хорошо подтверждается графиком на рис. 3, где

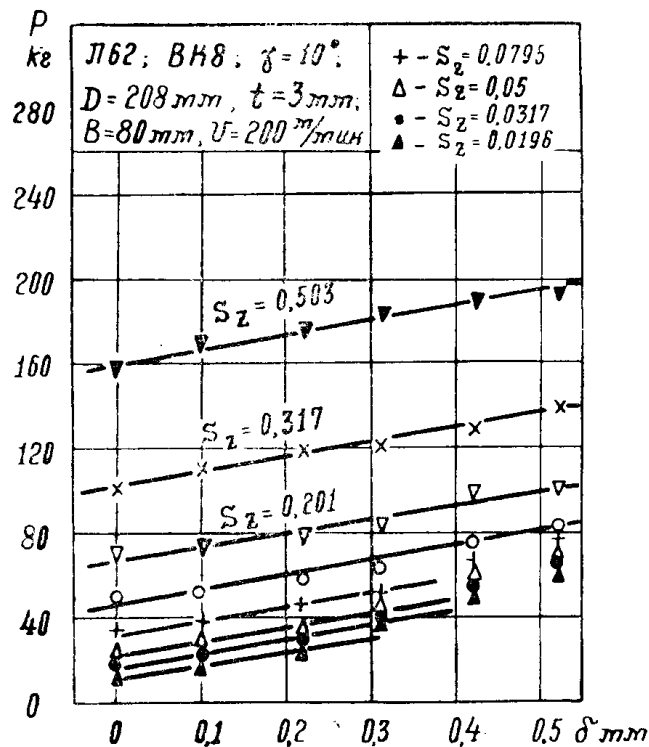


Рис. 3.

изменение силы от износа выражено параллельными линиями для всех подач.

Аналогичные результаты получены и при других условиях фрезерования торцевыми фрезами.



Степенные уравнения не отражают этой характерной особенности изменения сил от износа, так как в них износ учитывается множителем  $k_s$ , тогда как правильнее было бы учитывать прирост сил при износе вторым слагаемым в уравнении, т. е. уравнение сил резания должно состоять из двух слагаемых, что и намечается сделать при дальнейшей разработке этого вопроса.

При цилиндрическом фрезеровании, когда толщина стружки измеряется сотыми долями миллиметра и доля сил на задней грани в суммарной окружной силе велика, влияние износа на силы резания оказывается еще более существенным (рис. 4). Аналогичные резуль-

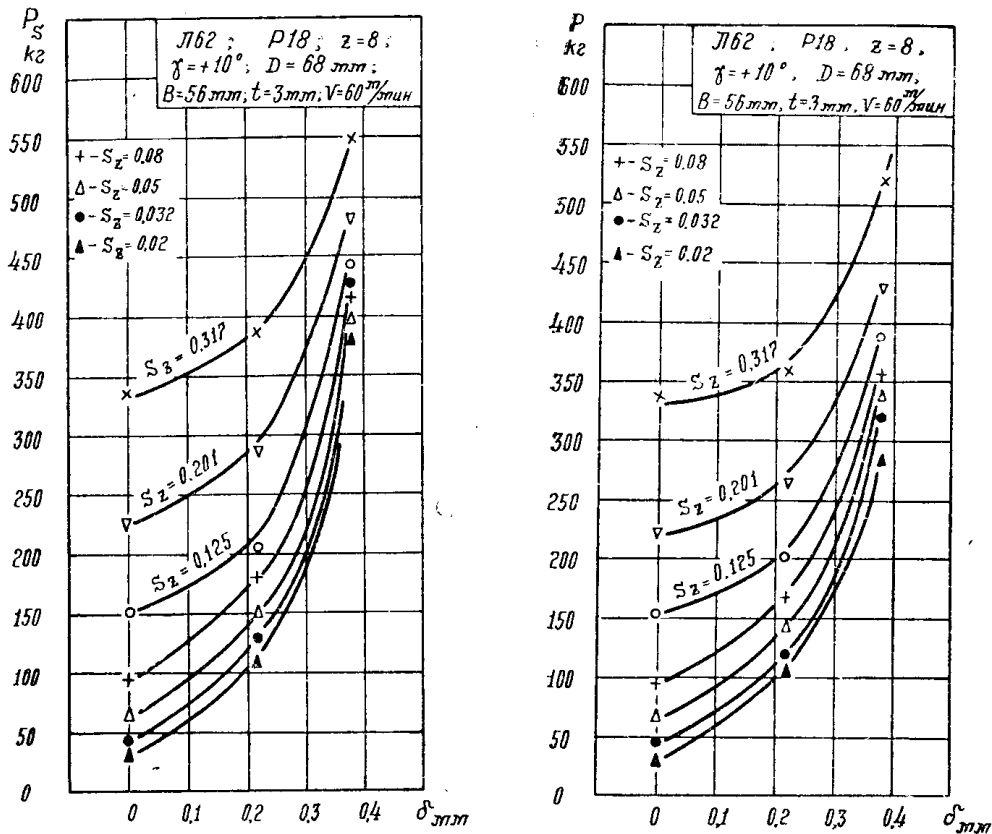


Рис. 4.

таты получены и при фрезеровании других металлов цилиндрическими фрезами.

Следует отметить также, что при фрезеровании изношенными фрезами значительно сильнее оказывается влияние скорости на силы резания, особенно на силу подачи.

Так, при цилиндрическом фрезеровании острой твердосплавной фрезой латуни ЛС59-1 силы резания в широком диапазоне изменения скоростей ( $v=20 \div 450 \text{ м/мин}$ ) остаются практически постоянными, тогда как при фрезеровании этой же латуни изношенной фрезой при некоторой скорости наблюдается резкий рост сил резания (рис. 5). При этом процесс резания практически прекращается, резко возрастает температура и происходит пластическое „выдавливание“ металла из зоны резания. Подобное явление наблюдается для всех цветных металлов за исключением меди, но при разных режимах резания. Аналогичный процесс происходит и при торцевом фрезеровании, особенно с малыми подачами. Одновременно с резким ростом сил резания значительно ухудшается качество обработанной поверхности. Все это

заставляет допустимый износ по задней грани ограничить величиной  $\delta = 0,25 \div 0,3$  мм, что значительно меньше, чем допустимый износ при фрезеровании черных металлов,

На основании экспериментальных данных величина поправочных коэффициентов на окружающую силу  $k_b$  для максимально допустимого износа изменяется в пределах  $1,15 \div 5$ , причем меньшие значения

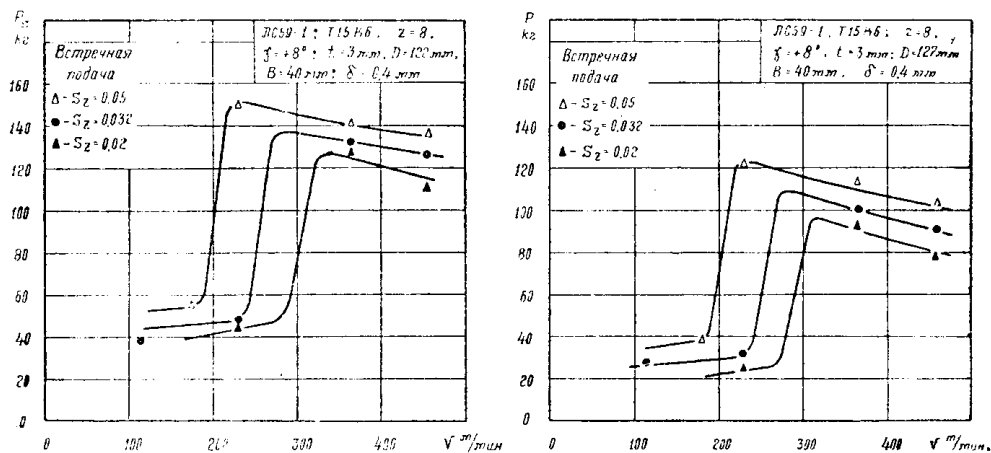


Рис. 5.

поправочных коэффициентов соответствуют максимальным подачам, а большие — минимальным подачам.

Широкие пределы изменения величины  $k_b$  еще раз подчеркивают необходимость расчета сил с учетом разделения сил на передней и задней гранях.

#### Влияние угла в плане на силы резания

Влияние угла в плане на силы резания изучалось при фрезеровании торцевыми твердосплавными фрезами латуней Л62 и ЛС59-1. Исследования показали, что уменьшение угла в плане приводит к увеличению длины режущей кромки, что, в свою очередь, приводит к росту сил на задней грани и, следовательно, к росту суммарной окружной силы резания.

Средние значения поправочного коэффициента  $k_\varphi$  приведены в табл. 9.

Таблица 9

| Марка металла | $K_\varphi$          |                      |                      |                      |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|               | $\varphi = 90^\circ$ | $\varphi = 60^\circ$ | $\varphi = 45^\circ$ | $\varphi = 80^\circ$ |
| Л62           | 1                    | 1,04                 | 1,06                 | 1,08                 |
| ЛС59-1        | 1                    | 1,12                 | 1,18                 | 1,25                 |

#### Влияние глубины и ширины фрезерования на силы резания

Исследование влияния глубины и ширины фрезерования проводилось как для цилиндрического, так и для торцевого фрезерования. Опыты показали, что при фрезеровании торцевыми фрезами цветных металлов силы резания прямо пропорциональны глубине фрезерования и показатель степени при глубине „ $l$ “ можно считать равным нулю. Ширина фрезерования при торцевом фрезеровании, а также ширина и глубина резания при цилиндрическом фрезеровании в уравнениях (1) и (2) учтены правильно.

Помимо вышеперечисленных факторов, влияющих на силы резания, в работе исследовано влияние взаимного расположения торцевой фрезы и заготовки. При симметричном фрезеровании окружная сила имеет наименьшее значение.

При смещении оси фрезы относительно оси заготовки силы на передней грани не изменяются, зато силы на задней грани увеличиваются за счет увеличения числа зубьев, одновременно находящихся под стружкой, что приводит к росту окружной силы (рис. 6).

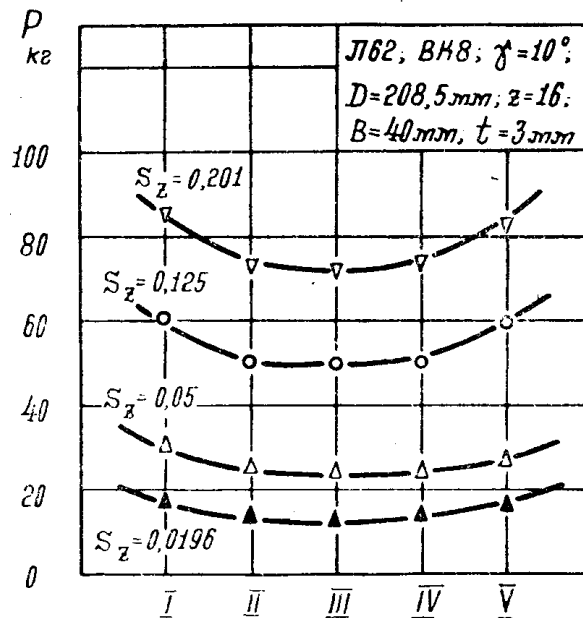


Рис. 6.

### Расчет силы подачи

Сила подачи может быть найдена либо по степенным уравнениям, подобным (1) и (2), либо через отношение  $\frac{p_s}{p}$ . Значительно проще воспользоваться вторым вариантом определения силы подачи, что и было сделано в проведенной работе.

При встречном цилиндрическом фрезеровании отношение  $\frac{p_s}{p}$  для всех цветных металлов при любых условиях фрезерования лежит в пределах

$$\frac{p_s}{p} = 1 \pm 10\% . \quad (3)$$

При попутном фрезеровании отношение  $\frac{p_s}{p} = 0,8 \pm 10\% . \quad (4)$

При торцевом фрезеровании отношение  $\frac{p_s}{p}$  имеет более сложную зависимость, чем при цилиндрическом фрезеровании. Для симметричного фрезерования торцевыми быстрорежущими и твердосплавными фрезами отношение  $\frac{p_s}{p}$  для всех исследуемых металлов в зависимости от подачи приведено на рис. 7 и 8.

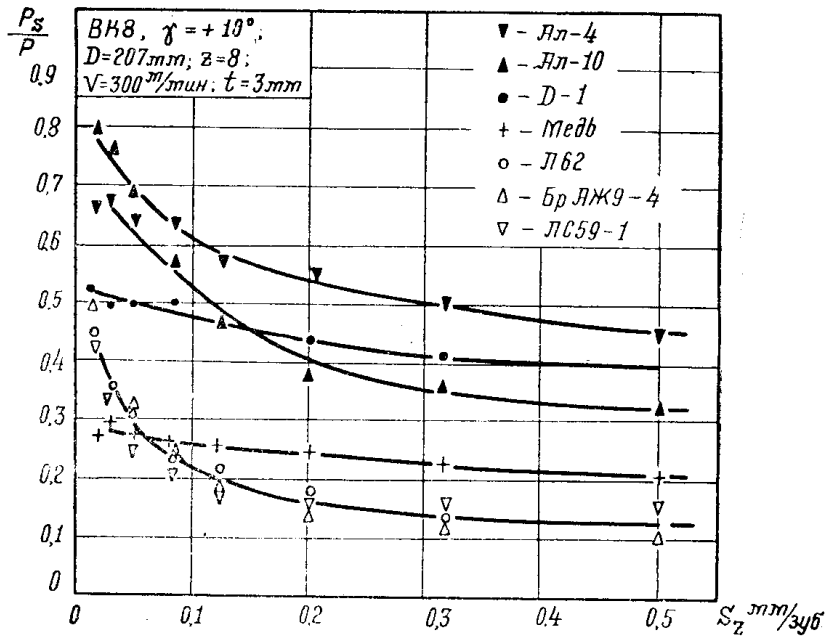


Рис. 7.

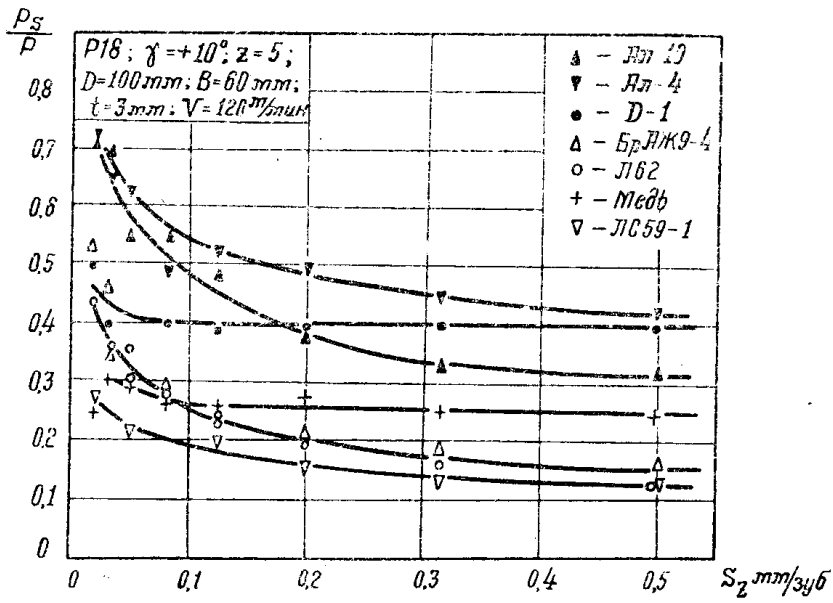


Рис. 8.

Для несимметричного фрезерования торцевыми фрезами зависимость отношения  $\frac{P_s}{p}$  от взаимного расположения фрезы и заготовки исследована при фрезеровании латуни Л62 (рис. 9). Анализ этого исследования показал, что как для быстрорежущих, так и для твердосплавных торцевых фрез отношение  $\frac{P_s}{p}$  выражается уравнением (5)

$$\frac{P_s}{p} = \frac{P_s}{p} (s_2) + 2i, \quad (5)$$

где  $\frac{P_s}{p} (s_2) = \frac{P_s}{p}$  при симметричном фрезеровании и определяется из графиков на рис. 7 и 8.

$i = \pm \frac{e}{D}$  определяется в зависимости от взаимного расположения

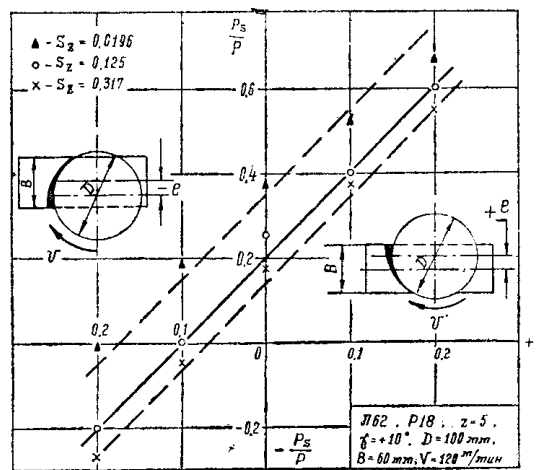


Рис. 9,

фрезы и заготовки, при этом  $l$  — расстояние между осями фрезы и заготовки,  $D$  — диаметр фрезы.

Знак „+“ берется тогда, когда резание начинается с меньшей толщины и заканчивается на большей.

Знак „-“, когда резание начинается с большей толщины и заканчивается на меньшей.

Ввиду того, что влияние скорости резания и ширины фрезерования на отношение  $\frac{P_s}{p}$  невелико, его можно не учитывать.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Розенберг. Динамика фрезерования. Москва, Государственное издательство „Советская наука“, 1945.