

РАСЧЕТ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

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

В настоящее время для расчета сил резания при фрезеровании используются эмпирические степенные зависимости типа:

$$P = CB^{\omega} Z S_z^y t^x D^u V^n K.$$

Коэффициент C и K , а также показатели степени при параметрах процесса фрезерования ω , y , x , u , n , фигурирующие в этих уравнениях, не имеют строгого физического смысла и, следовательно не могут правильно учесть зависимость силы резания от параметров процесса резания, физико-механических свойств обрабатываемого материала, материала и геометрии инструмента. Данные уравнения описывают процесс резания лишь приблизительно и в силу этого не обеспечивают достаточной точности результатов расчета.

Основным источником погрешностей степенной зависимости является то обстоятельство, что эта формула не учитывает наличия двух самостоятельных групп, составляющих суммарной силы резания, физическая природа которых совершенно различна.

Силы, действующие на переднюю грань инструмента, определяются процессом деформирования металла в стружку, а потому зависят прежде всего от объема снимаемого слоя и степени его деформации.

Силы, действующие на заднюю грань инструмента в процессе деформирования стружки не участвуют и не зависят ни от объема снимаемого металла, ни от степени деформации стружки. Эта группа сил, являясь силами упруго-пластического контакта задней грани инструмента с обработанной поверхностью зависит прежде всего от площади контакта и упругих свойств обрабатываемого материала.

Учитывать наличие двух самостоятельных групп сил необходимо еще и потому, что при различных условиях резания их соотношение будет различно.

При толстых стружках и остро заточенном инструменте силы на передней грани значительно больше сил на задней грани и последними можно пренебречь.

При тонких стружках, что особенно часто имеет место при фрезеровании, силы на задней грани сравнимы с силами на передней грани и пренебрегать ими нельзя.

Изменение переднего угла влияет только на силы на передней грани, тогда как силы на задней грани остаются постоянными.

Так, на рис. 1 прямые зависимости силы резания от подачи при постоянной температуре (показание гальванометра $T = 25 \mu A$) для различных передних углов отсекают на оси ординат одно и то же значение сил на задней грани — 6 кг. Следовательно, в уравнениях сил резания при различных передних углах переменным будут только те части, которые определяют силы на передней грани.

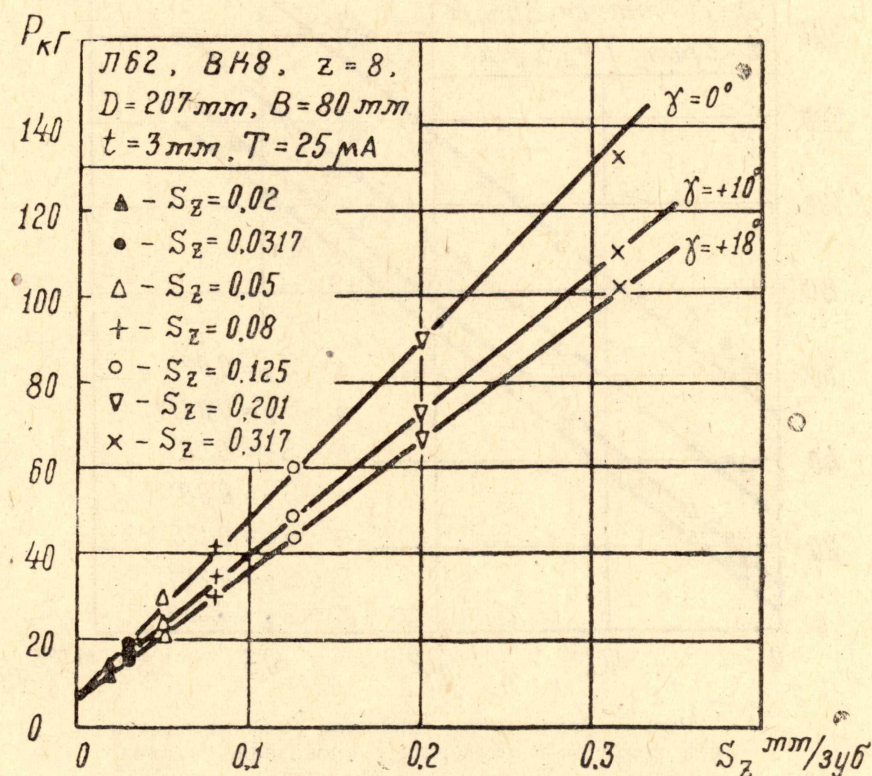


Рис. 1. Зависимость окружной силы от подачи при постоянной температуре (показание гальванометра $T = 25 \mu A$) для различных передних углов.

Наоборот, при увеличении износа зубьев фрезы по задней грани суммарное усилие резания возрастает только за счет сил, действующих на заднюю грань, тогда как силы на передней грани остаются неизменными. Справедливость этого положения подтверждается графиком на рис. 2.

Из графика видно, что прямые $P = f(S_z)$ для различной степени износа $T = 25 \mu A$ параллельны друг другу, но смещены по вертикальной оси. Вертикальное смещение вызвано ростом сил на задней грани. Параллельность прямых объясняется неизменностью сил на передней грани. Для малых подач, когда силы на передней грани малы прирост сил на задней грани за счет износа приведет к значительному относительному росту суммарной силы. Для больших подач, когда основными силами являются силы на передней грани, прирост сил на задней грани за счет износа приведет к менее существенному относительному изменению суммарной силы.

В степенных уравнениях прирост сил за счет износа инструмента учитывается общим сомножителем и, как видно из рис. 2, этот сомножитель должен быть различным для различных подач.

Указанные несовершенства степенной зависимости заставили искать такую форму уравнения для суммарной силы при фрезеровании, которая бы отдельно учитывала влияние различных параметров процесса фрезерования на каждую из указанных групп сил резания.

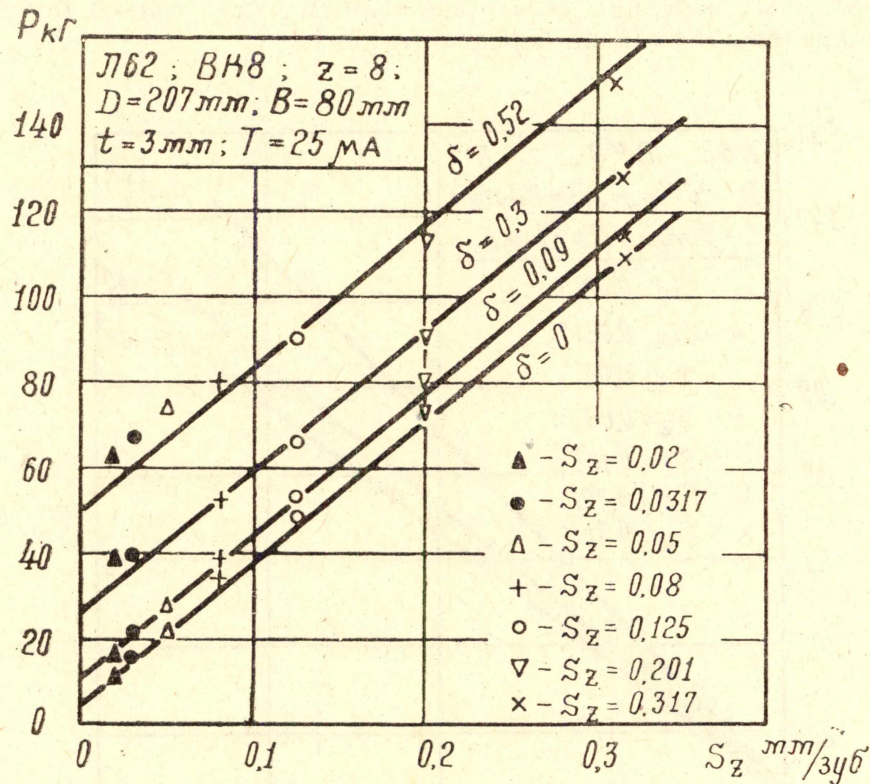


Рис. 2. Зависимость окружной силы от подачи при постоянной температуре (показание гальванометра $T = 25 \mu\text{A}$) для различных степеней износа.

Ниже приводится краткий вывод уравнений для определения сил резания при торцевом фрезеровании с учетом разделения сил на передней и задней гранях и методика определения постоянных коэффициентов, входящих в эти уравнения.

Главная составляющая силы резания на передней грани определяется простой зависимостью [1].

$$P_{\text{пр}} = \tau \kappa a v, \quad (1)$$

где τ — касательное напряжение в зоне сдвига стружки, в $\text{кг}/\text{мм}^2$,

a — толщина среза, в мм ;

v — ширина среза, в мм ;

κ — множитель, зависящий от переднего угла, коэффициента трения и степени деформации стружки [1, 2] (безразмерная величина).

Для простоты и удобства уравнение (1) можно записать

$$P_{\text{пр}} = C_{\text{пр}} a v,$$

где

$$C_{\text{пр}} = \tau \kappa.$$

Сила на задней грани в направлении скорости резания равна

$$P_{\text{зг}} = C_{\text{зг}} \sum l,$$

где $\sum l$ — суммарная длина режущих кромок инструмента, находящихся в контакте с поверхностью резания;

$C_{зг}$ — сомножитель, зависящий от обрабатываемого металла, скорости резания, температуры и от износа инструмента по задней грани.

Тогда окружная сила в общем виде запишется

$$P = P_{пг} + P_{зг} = C_{пг} av + C_{зг} \sum l.$$

В развернутом виде выражение для средней окружной силы будет иметь следующий вид:

$$P_{ср} = \frac{BtZ}{\pi D} \left[C_{пг} S_z + C_{зг} \frac{\Theta D}{2B} \left\{ \frac{1}{\sin \varphi} + \frac{\ln \left(1 - \frac{\sin \varphi_{п}}{\sin \varphi} \right)}{t} \right\} \right], \quad (2)$$

где B — ширина фрезерования, в мм;
 t — глубина фрезерования, в мм;
 Z — число зубьев фрезы;
 D — диаметр фрезы, в мм;
 S_z — подача на зуб, в мм/зуб;
 Θ — угол контакта фрезы с заготовкой, в радианах;
 φ — угол в плане главной режущей кромки;
 $l_{п}$ — длина переходной режущей кромки, в мм;
 $\varphi_{п}$ — угол в плане переходной режущей кромки.

Для случая симметричного фрезерования фрезой с углом в плане $\varphi = 90^\circ$ и $l_{п} = 0$ уравнение (2) примет вид

$$P_{ср} = \frac{BtZ}{\pi D} \left[C_{пг} S_z + C_{зг} F_1 \left(\frac{B}{D} \right) \right].$$

Величина $F_1 \left(\frac{B}{D} \right)$ может быть либо рассчитана

$$F_1 \left(\frac{B}{D} \right) = \frac{\arcsin \frac{B}{D}}{\frac{B}{D}},$$

либо принята из табл. 1

Таблица 1

$\frac{B}{D}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$F_1 \left(\frac{B}{D} \right)$	1,0	1,0	1,01	1,02	1,05	1,08	1,1	1,16	1,25	1,57

Сила подачи также складывается из силы на передней грани $P_{с пг}$ и силы на задней грани $P_{с зг}$.

При этом

$$P_{с пг} = U_{пг} av,$$

$$P_{с зг} = U_{зг} \sum l.$$

Здесь $U_{пг}$ — сомножитель, подобный $C_{пг}$, $U_{зг}$ — подобный $C_{зг}$, причем

$$U_{пг} = C_{пг} \operatorname{tg} (\eta - \gamma),$$

где η — угол трения, γ — передний угол. Тогда сила подачи выразится

$$P_s = P_{s\text{ пр}} + P_{s\text{ зг}} = U_{\text{пр}} av + U_{\text{зг}} \sum l.$$

В развернутом виде выражение для средней силы подачи в случае симметричного фрезерования будет иметь следующий вид:

$$P_{s\text{ ср}} = \frac{Zt}{\pi} \left[U_{\text{пр}} S_z \sin \varphi_{\text{прив}} \cdot \frac{\Theta + \sin \Theta}{4} + U_{\text{зг}} \sin \frac{\Theta}{2} \right],$$

где $\varphi_{\text{прив}}$ — приведенный угол в плане [3].

В простейшем случае, когда $\varphi = 90^\circ$, $l_{\text{п}} = 0$ можно принять $\varphi_{\text{прив}} = \varphi$, тогда

$$P_{s\text{ ср}} = \frac{BtZ}{\pi D} \left[U_{\text{пр}} S_z F_2 \left(\frac{B}{D} \right) + U_{\text{зг}} \right],$$

где $F_2 \left(\frac{B}{D} \right)$ может быть либо рассчитана по формуле

$$F_2 \left(\frac{B}{D} \right) = \frac{\Theta + \sin \Theta}{4 \frac{B}{D}},$$

либо найдена из табл. 2.

Таблица 2

$\frac{B}{D}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$F_2 \left(\frac{B}{D} \right)$	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,94	0,91	0,88	0,84	0,79

Многочисленные опыты, проведенные авторами по черным и ряду цветных металлов, показали, что для каждого металла при постоянном переднем угле коэффициенты $C_{\text{пр}}$, $C_{\text{зг}}$, $U_{\text{пр}}$ и $U_{\text{зг}}$ будут постоянными при режиме постоянной деформации, что близко к режиму постоянной температуры или к режиму постоянной стойкости.

Справедливость этого положения подтверждается графиком (рис. 3), на котором окружная сила и сила подачи изменяются при постоянной температуре, прямопропорционально подаче.

Из этого графика можно для каждой температуры определить значения коэффициентов $C_{\text{пр}}$, $C_{\text{зг}}$, $U_{\text{пр}}$ и $U_{\text{зг}}$, необходимых для расчета сил резания и представить их в зависимости от температуры (рис. 4) (для латуни Л62 значения $C_{\text{зг}}$ и $U_{\text{зг}}$ при всех температурах остаются постоянными и равными $C_{\text{зг}} = U_{\text{зг}} = 1,7$).

Так как при проведении каждого опыта измерялись не только силы, но и температура, то по результатам опыта и рис. 4 можно построить график (рис. 5) изменения постоянных $C_{\text{пр}}$, $C_{\text{зг}}$, $U_{\text{пр}}$ и $U_{\text{зг}}$ в зависимости от скорости для каждой подачи (для примера приводится только один график — график изменения $C_{\text{пр}}$).

На основании последнего можно получить график (рис. 6) изменения $C_{\text{пр}}$ в зависимости от скорости и подачи. Поскольку каждая кривая этого графика соответствует постоянной температуре, то на основании рис. 4 каждая из этих кривых будет не только кривой постоянного $C_{\text{пр}}$, но и кривой постоянного $U_{\text{пр}}$.

По этому графику не трудно определить и промежуточные значения $C_{\text{пр}}$ и $U_{\text{пр}}$ для любых значений скорости резания и подачи.

Выше было указано, что передний угол влияет только на силы на передней грани, следовательно, для различных передних углов

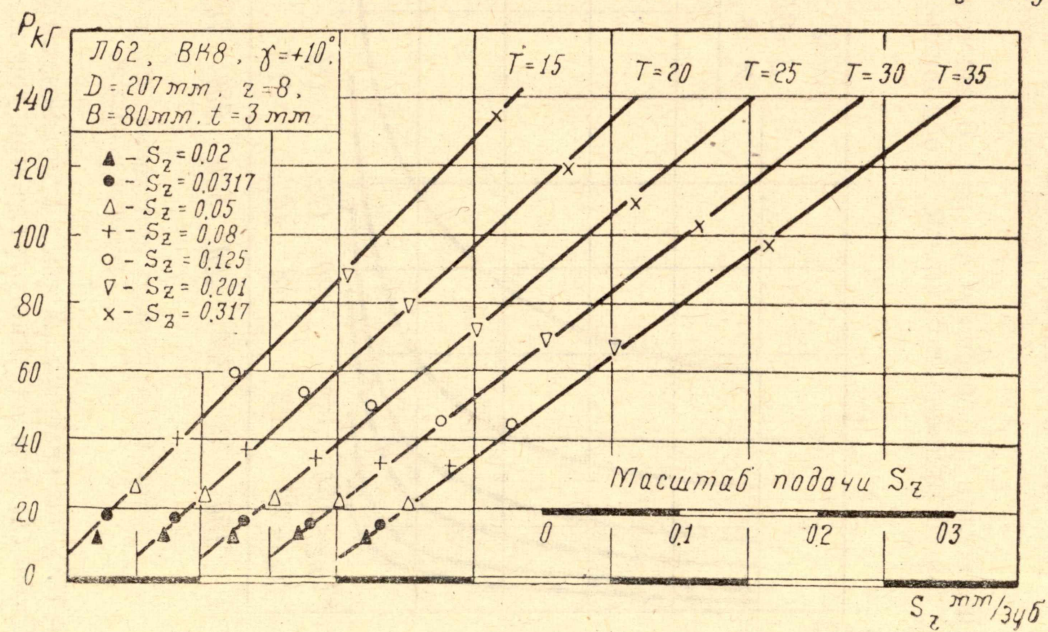
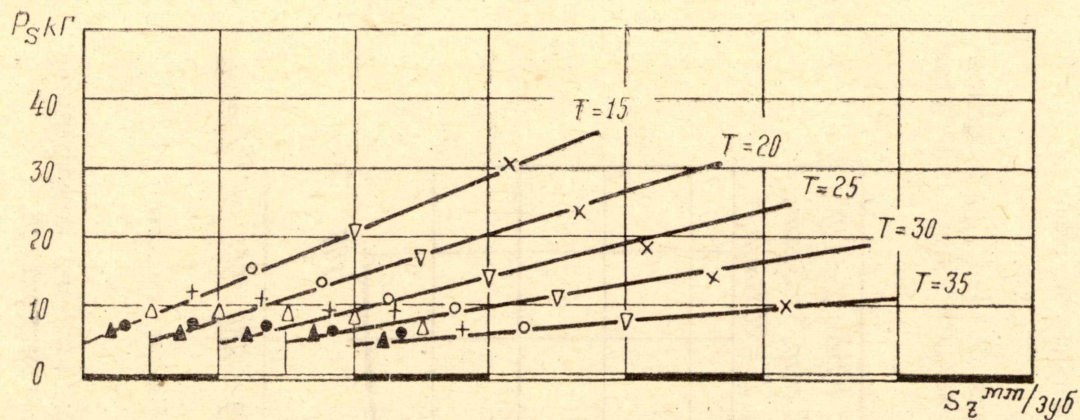


Рис. 3. Зависимость окружной силы и силы подачи от подачи на зуб при различных температурах.

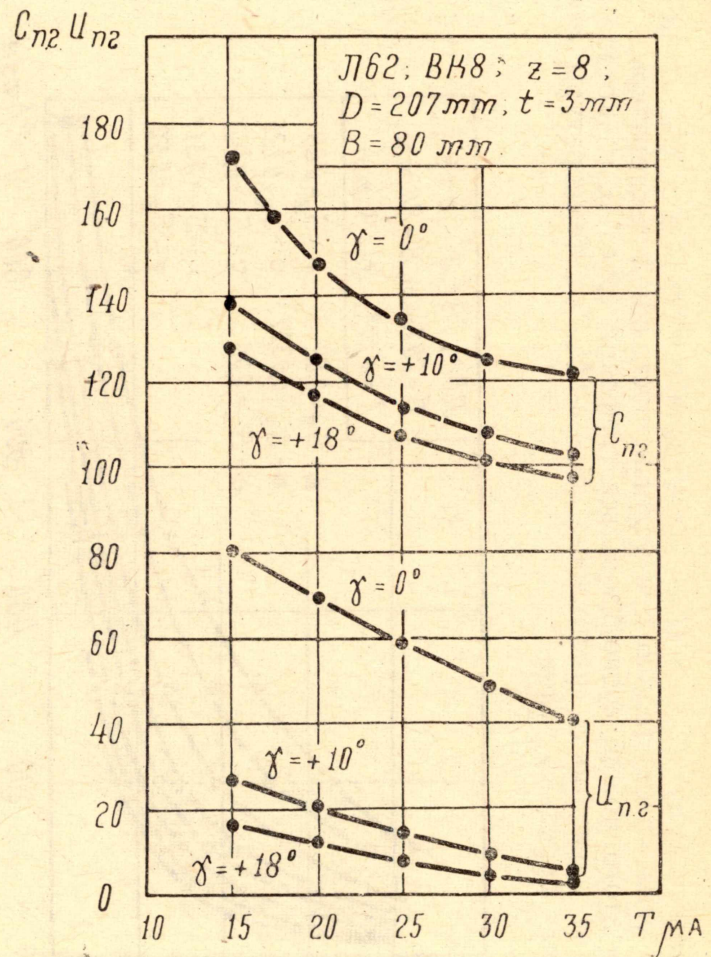


Рис. 4. Зависимость постоянных C_{nz} и U_{nz} от температуры для различных передних углов.

переменными будут $C_{пг}$ и $U_{пг}$. Дать зависимость $C_{пг}$ и $U_{пг}$ от переднего угла можно только при условии постоянной температуры.

Для этого можно воспользоваться графиком (рис. 4), на котором приведена зависимость постоянных $C_{пг}$ и $U_{пг}$ от температуры для различных передних углов.

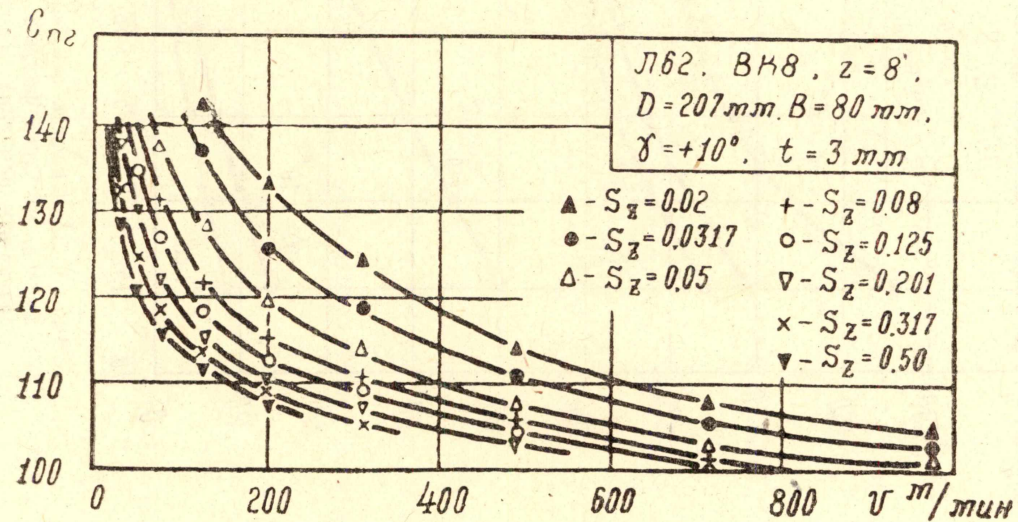


Рис. 5. Зависимость коэффициента $C_{пг}$ от скорости резания для различных подач.

Определив по графику на рис. 6 значения $C_{пг}$ и $U_{пг}$ для основного угла (в приведенном примере основным является передний угол

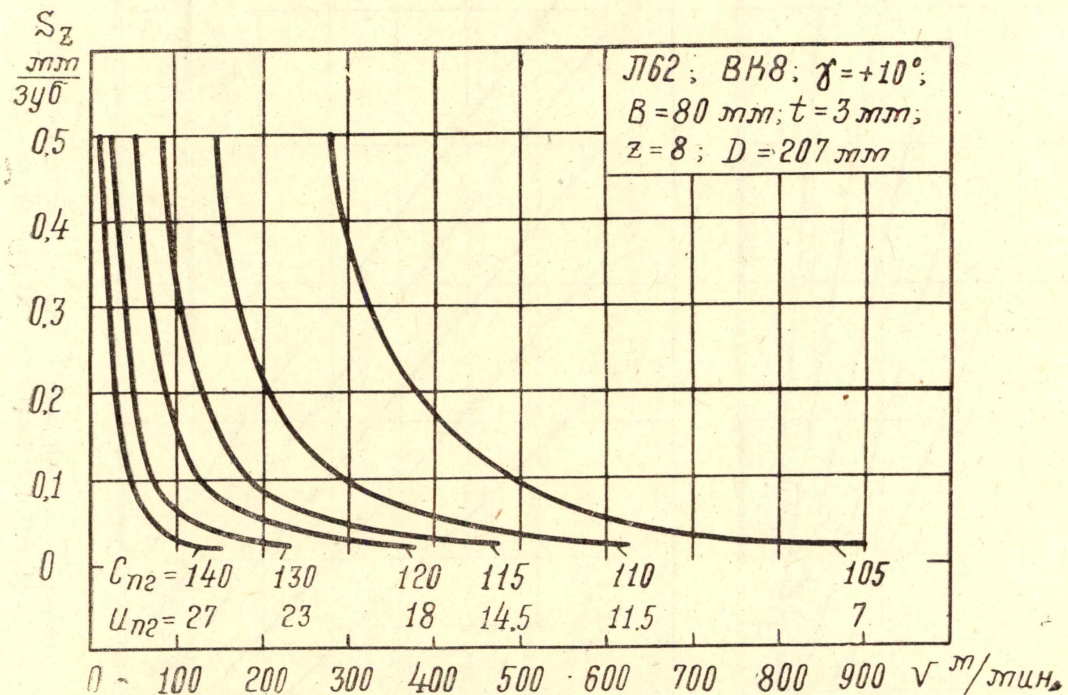


Рис. 6. Зависимость постоянных $C_{пг}$ и $U_{пг}$ от скорости резания и подачи.

$\gamma = +10^\circ$), по графику на рис. 4 можно найти значение коэффициентов $C_{пг}$ и $U_{пг}$ для заданного угла при той же температуре.

По аналогичной методике определяются постоянные $C_{зг}$ и $U_{зг}$ для определения сил на задней грани, однако, для большинства металлов их зависимость от скорости резания и подачи настолько незначительна, что ею можно пренебречь без внесения заметной неточности в результаты расчета.

Как указано выше, постоянные $C_{зг}$ и $U_{зг}$ в значительной степени зависят от величины износа инструмента по задней грани.

Методика определения влияния износа на эти постоянные аналогична методике определения зависимости постоянных $C_{пг}$ и $U_{пг}$ от переднего угла.

Опыты, проведенные авторами по одиннадцати маркам сталей и четырем маркам цветных металлов, показали высокую точность расчета сил резания на основании изложенной методики. Отклонения действительных сил резания, измеренных динамометром, отличаются от расчетных не более чем на 5—7%.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Розенберг и А. Н. Еремин. Элементы теории процесса резания металлов, Машгиз, 1956.
 2. А. М. Розенберг и Л. А. Хворостухин. Твердость и напряжение в пластически деформированном теле. Журнал технической физики, т. XXV, вып. 2, 1955.
 3. Л. А. Хворостухин. Расчет сил при скоростном резании на основе физико-механических характеристик металлов. Диссертация, Томск, 1953.
-